



UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE - FRANCE

UNIVERSITÉ DE LOMÉ- TOGO

Ecole doctorale E2S (UB)

Laboratoire de Biologie végétale appliquée (UL)



THÈSE

*Pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de la Terre et
de l'Environnement*

Par

Kokou KINTCHE

**ANALYSE ET MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DES INDICATEURS
DE LA FERTILITÉ DES SOLS CULTIVÉS EN ZONE COTONNIÈRE DU
TOGO**

Soutenu publiquement le 24 novembre 2011, devant le jury composé de :

Pierre CURMI- Professeur- AgroSup-Dijon

Président

Sylvie DOUSSET- Professeur- Université de Nancy

Rapporteur

Martial BERNOUX- Directeur de recherche- IRD Montpellier

Rapporteur

Claire CHENU- Professeur- Université de Paris

Examineur

Safya MENASSERIE- Maître de Conférences- INRA Rennes

Examineur

Jean LEVEQUE- Maître de Conférences-HDR- Université Bourgogne **Co-directeur**

Jean SOGBEDJI- Maître de Conférences-HDR- Université de Lomé **Co-directeur**

Hervé GUIBERT- Chercheur -CIRAD Montpellier

Encadrant

Olivier MATHIEU- Maître de Conférences- Université Bourgogne

Invité



Gloire
à l'Eternel !

REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée avec la collaboration scientifique de l'Université de Bourgogne à travers le laboratoire BIOGEOSCIENCE, du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), de l'unité de Biologie Végétale Appliquée de l'Université de Lomé et de l'Institut Togolais de Recherche Agronomique (ITRA). Elle a notamment bénéficié du financement et de l'appui matériel de l'Ambassade de France au Togo à travers le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) d'une part et ceux du CIRAD d'autre part.

Je remercie l'Ambassade de France qui, à travers M. Frédéric MERLET (Chef du SCAC) et son prédécesseur Olivier BOUCHER, m'a octroyé des bourses de séjours en France et d'autres appuis financiers sans lesquels ce travail n'aurait été en aucun cas possible. Que M. Yves YARD (conseiller adjoint au SCAC, actuellement à la retraite) soit honoré à travers l'aboutissement heureux de ce travail dont il a été le pionnier. J'exprime ma profonde gratitude à son successeur, M. Cyrille LEDEAUT et à Mme Isabelle BEAUMADIER (Chargée des bourses au SCAC) pour la disponibilité dont ils ont toujours fait preuve et l'assiduité avec laquelle ils ont toujours géré mes dossiers.

Je remercie les autorités du CIRAD et notamment celles de l'UR 102 Systèmes de Cultures Annuels, pour leurs appuis multiformes. Ils m'ont plusieurs fois accueilli comme stagiaire dans leurs institutions puis m'ont accordé des financements et appuis matériels sans lesquels ce travail ne serait abouti. Je suis particulièrement très reconnaissant à M. Florent MARAUX (Directeur de l'UR Systèmes de Cultures Annuels) pour l'intérêt qu'il a accordé à mes travaux et pour son amour manifesté à mon égard. Que tout son staff administratif, en particulier Mesdames Jocelyne SALLIN, Brigitte GIUDICELLI et Liliane DECLOEDT, trouve en ce mémoire le signe de ma profonde gratitude pour l'ambiance cordiale et facilitatrice créée autour de moi tout le long de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Mme Sophie BEJEAN (Présidente de l'Université de Bourgogne) et à M. Koffi AHADZI-NONOU (Président de l'Université de Lomé) pour avoir accepté la cotutelle entre les deux universités dans le cadre de cette thèse. Je suis très reconnaissant à M. Alain PUGIN (Directeur de l'Ecole Doctorale E2S de l'Université de Bourgogne) et au Professeur Koffi AKPAGANA (responsable de l'Ecole Doctorale Biologie Végétale Appliquée de l'Université de Lomé), pour avoir usé de leurs institutions comme cadre académique de ma thèse. Que M. Pascal NEIGE (Chef de l'UMR BIOGEOSCIENCES

qui a été le cadre technique de mes travaux à l'Université de Bourgogne) soit infiniment remercié.

Qu'il me soit permis de rendre tous les hommages les plus respectueux au Dr Comlan Atsu AGBOBLI (Directeur Général de l'ITRA) qui a bien voulu faire de moi un des siens. Vous m'avez engagé en qualité de stagiaire dans le processus de cette thèse avant mon recrutement à la fonction publique. Daigne le seigneur vous combler de ses bénédictions, cher Directeur.

J'adresse une mention spéciale de mes remerciements à M. Bèdibètè BONFOH, Directeur du Centre de Recherche Agronomique des Savanes Humides (CRA-SH). Dans votre volonté d'améliorer le niveau scientifique des jeunes chercheurs sous votre direction, vous vous êtes investi corps et âme pour l'aboutissement de mes travaux de thèse. Dans des conditions assez difficiles, vous avez été attentif aux appels multidirectionnels qui ont marqué la collaboration multi-institutionnelle dans le cadre de cette thèse. Merci pour vos sages et précieux conseils. Je vous suis très reconnaissant et prends l'engagement ferme de vous faire toujours honneur, cher Directeur. Que l'amour que vous avez manifesté à mon endroit accompagne vos progénitures. Merci également à M. Yentchabré POCANAM, Directeur du Centre de Recherche Agronomique du Littoral (CRA-L), pour avoir été membre de mon comité de thèse.

La qualité scientifique de ce travail revient à MM. Hervé GUIBERT, Pablo TITTONELL et Michel CRETENET du CIRAD, à MM. Jean LEVEQUE, Olivier MATHIEU et Marie-Jeanne MILLOU de l'Université de Bourgogne puis à M. Jean SOGBEDJI de l'Université de Lomé. Que M. GUIBERT trouve en cette œuvre le signe de ma profonde gratitude pour ses efforts qui ont fait de cette thèse un projet réussi. La recherche de moyens financiers et matériels d'une part puis la valorisation scientifique et la qualité de mes travaux d'autre part, ont été des préoccupations que vous avez assurées avec plein succès. Vous m'avez accueilli en qualité de stagiaire et hébergé pendant trois semaines à Cotonou. Vous m'avez invité au Cameroun et fait partager les expériences des autres chercheurs. On dirait que vous avez tout abandonné pour ma seule cause, M. GUIBERT. Je garderai de vous, cher encadrant, l'image d'un homme aux qualités professionnelles et sociales impressionnantes. Puisse Dieu vous garder et vous récompenser de vos bienfaits. M. TITTONELL, permettez-moi de vous tutoyer. Tu es formidable. Tes qualités scientifiques, professionnelles et sociales sont impressionnantes. Ta capacité d'analyse est immense. J'aurais inutilement vécu si je ne t'avais pas connu. A travers ton guide, j'ai réussi à ré-paramétrer le modèle RothC. Mes publications ont été possibles grâce à toi. Je ne saurai vous remercier assez, M. TITTONEL. Que MM. LEVEQUE et

SOGBEDJI, à qui je dois la codirection de cette thèse, soient infiniment remerciés pour l'attention filiale et la rigueur scientifique qu'ils ont accordées à mon travail. Je suis conscient de vous avoir trop dérangé et contraint parfois à tout abandonné pour ma seule cause. Envers vous, chers dirigeants, ma reconnaissance demeurera à jamais inégalée. Merci au Professeur Jean François DECONINCK qui a codirigé cette thèse du côté de l'Université de Bourgogne avant de céder la main à Mr LEVEQUE. Merci également au Professeur Koffi AKPAGANA qui a été l'un des pionniers de mes travaux du côté de l'Université de Lomé avant de céder la main M. SOGBEDJI. Merci à MM. CRETENET, MATHIEU et Mme MILLOU pour leurs efficaces contributions à la qualité scientifique de ce travail. Encore merci à M. CRETENET pour m'avoir facilité les séjours à Montpellier. Envers vous, notre reconnaissance demeurera à jamais inégalée.

J'exprime mes vifs remerciements à MM. Martial BERNOUX et Sylvie DOUSSET qui, en qualité de rapporteurs, ont accepté de juger mon travail malgré les multiples occupations. Je suis redevable envers MM. Pierre CURMI, Safya MENASSERIE et Claire CHENU pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer à l'examen de ce travail en qualité de membres de jury.

Mes remerciements vont :

- à M. Akouété F. TEKOE (Directeur Administratif, Financier et Comptable (DAFC) de l'ITRA) pour l'entière disponibilité dont il a toujours fait preuve dans le processus de mes inscriptions à l'Université de Lomé. A ces collaborateurs, notamment MM. GNENI, ADJA et AMEVIGBE, pour l'ambiance cordiale et facilitatrice qu'ils ont créée autour de moi. J'ai une dette de gratitude pour l'entière disponibilité dont vous avez fait preuve, chers aînés.

- à M. Kodjo LABARE (Directeur Scientifique de l'ITRA) pour ses soutiens moraux. Je vous dis infiniment merci.

- à tous les chercheurs du CRA-SH : MM. AKANTETOU, TCHAGODOMOU, TOKORO, TOKY, AYEVA, GNONFAM et aux agriculteurs interviewés, leur liste est longue. Que les uns et les autres trouvent en cette œuvre l'expression de ma profonde gratitude. Je remercie particulièrement M. AKANTETOU, qui a été le maître d'œuvre de mes travaux de terrain en cas d'absence. Chers collaborateurs, infiniment merci.

- à M. Kossi ADOMEFA, Directeur scientifique de l'ITRA actuellement à la retraite, pour son amour et son soutien. Nous laissons le soin au bon Dieu de vous remercier, cher Directeur.

C'est le lieu de témoigner ma profonde gratitude à M. Soklou WOROU (chercheur à l'ITRA actuellement à la retraite) pour son amour, les précieux et sages conseils qu'il ne cesse de m'adresser. Cher frère, que le Seigneur guide vos pas et vous comble de vos bienfaits.

Merci à M. Katanga TCHA, qui m'a soutenu durant tout mon cursus universitaire et professionnel. Que le Seigneur guide vos pas et vous comble de vos bienfaits, cher honorable.

Merci à M. Kossi KOKOU, secrétaire du CRA-SH, pour son appui à la mise en forme de ce document.

A ma femme Blandine, je dis merci pour son soutien et sa compréhension, surtout pendant les phases difficiles de cette thèse. Toutes mes excuses à ma fille Orély. Elle est née au moment difficile de mes travaux au point que j'ai peut être manqué mes responsabilités parentales à son égard. Soit honorée à travers l'aboutissement heureux de cette thèse.

Je dis merci à tous les étudiants et doctorants avec qui j'ai travaillé et collaboré en France, notamment à Julien, Naulier, Julie, Clotilde, Elise, Nathalie, Aurélie, etc... Courage et abnégation à tous.

J'adresse ce document à la mémoire de ma maman, de mon papa de naissance et de celui adoptif. La nature vous a contraint à m'abandonner tout seul et tout petit. Je vous rassure, chers parents, que vous n'avez pas pourtant manqués à vos responsabilités. L'essentiel m'avait été dit !

Enfin, je suis conscient que plusieurs noms qui auraient du figurer dans cette rubrique n'y apparaissent pas. Que les uns et les autres trouvent en cette œuvre le signe de mes reconnaissances.

Résumé

L'objectif de l'étude a été d'analyser l'évolution de la fertilité du sol sous différentes pratiques culturales en zone cotonnière du Togo. L'étude a utilisé (i) des données de sols et de rendements de cultures observées pendant 20 à 40 ans à travers des expérimentations en station, (ii) des données de sols observées sur des parcelles paysannes et (iii) des données d'enquêtes conduites auprès des agriculteurs. En plus des teneurs du sol en C et minéraux qui ont été déterminées à différents âges pour chacune des expérimentations de longue durée, la quantité de C résistant et la vitesse de minéralisation de C ont été évaluées sur des échantillons de sol prélevés en dernières années de deux expérimentations. Trois modèles de complexité variable d'évolution du stock de C du sol ont été testés et le plus performant a été couplé au modèle QUEFTS et au bilan minéral apparent pour analyser l'effet de pratiques culturales sur la dynamique des indicateurs de la fertilité du sol. Bien que N, P et K ont été continuellement apportés à la dose recommandée par la recherche (RR) ou à cette dose augmentée de 50% (1.5RR), les rendements initiaux de 1,5 à 2 t ha⁻¹ pour le coton et de 2 à 3 t ha⁻¹ pour les céréales ont baissé pour ne représenter qu'environ 1 t ha⁻¹ après les 20 premières années de culture. La baisse de la production a été associée à la dégradation des déterminants de la fertilité du sol. Dans 0-20 cm du sol, les stocks initiaux de C de 15 à 39 t ha⁻¹ ont fortement baissé au cours des premières années après la défriche et ont atteint un équilibre après seulement 10 à 15 ans de culture. Cette baisse du stock de C a été très peu dépendante de la quantité de C retournant au sol. Bien que les entrées de C au sol diffèrent des traitements (nulles pour certains), la baisse du stock de C a été quasi-similaire. Les stocks de N ont également baissé sur tous les sites et cette baisse a été fortement associée à celle de C ($r = 0,93$) au point que l'effet de la fertilisation minérale a été pratiquement absent sur le stock N du sol. Dans le cas de la terre de barre, après 5 ans de culture, la potentialité du sol à fournir N aux cultures a baissé de 38-49%. Comparativement au traitement sans fertilisation, l'apport NPK à 1.5RR pendant 20 ans a triplé la baisse du pH du sol. Ainsi, la potentialité du sol à fournir P aux cultures a baissé de 25-59% après 5 ans de culture, cependant que le taux de P total a très faiblement baissé pour la plupart des sites. Sur les sites à deux saisons agricoles par an et à cause de la fréquence des apports, la fertilisation NPK avec RR ou 1.5RR a maintenu la concentration de K échangeable mais a accentué de 20 et 40% la baisse des concentrations de Ca et Mg respectivement. De ces évolutions contrastées, l'effet de la fertilisation a été traduit par un déséquilibre entre les bases échangeables du sol. La baisse observée du stock de C du sol a été mieux décrite avec le modèle à deux compartiments de C.

Le modèle a été paramétré avec un coefficient de minéralisation de la fraction labile de C de 0,15 à 0,24 et un stock de C stable qui représente selon les sites 33 à 67% du stock initial total. La quantité de C ayant résisté à l'hydrolyse HCl représente près de 30% de ce stock initial total et est ainsi plus faible que le stock de C stable ayant permis de décrire l'évolution du stock de C avec le modèle. Ainsi, autant à travers la simulation que par l'hydrolyse, les résultats révèlent un stock élevé de C stable et serait une des causes de la fragilité du statut organique de ces sols. Les explorations montrent que la restauration du stock de C de ces sols à des niveaux de 11 à 13 t ha⁻¹ ayant optimisé la réponse des cultures à la fertilisation minérale, nécessiterait des apports externes dont la faisabilité est peu réaliste. Au moins 3,5 t C ha⁻¹ an⁻¹ devront être apportées pendant 15 à 20 ans. À l'image des observations en station, la dégradation des indicateurs de la fertilité du sol a été forte sur les parcelles paysannes. La baisse de la culture de coton, qui est l'unique filière permettant aux agriculteurs d'accéder aux crédits intrants agricoles, a été traduite par la diminution du taux d'agriculteurs appliquant d'engrais minéraux. À l'exception du Nord du Togo où l'amendement organique a été renforcé par le compostage, de nouvelles techniques de maintien de la fertilité du sol n'ont pas été rapportées. Certains agriculteurs ont adopté et/ou élargi les superficies des cultures, tel que le manioc, qui sont peu risquées en raison de leur faible sensibilité aux aléas climatiques, pour lesquelles le niveau actuel de fertilité des sols permet des rendements pouvant justifier leurs coûts de production relativement faibles et qui nécessitent un faible niveau d'intrants.

En somme, les résultats de la présente étude indiquent que les pratiques culturales testées en station et celles existantes en milieu paysan ne maintiennent pas dans le long terme la fertilité de ces sols tropicaux. L'association des apports de Ca/Mg à ceux de N, P et K à la dose RR seraient (plus qu'un surdosage de P et K) une option pour mieux gérer leur fertilité minérale. D'autre part, le labour minimum mérite d'être associé aux apports externes de C pour mieux gérer leur fertilité organique.

Mots clés : Fertilité sols tropicaux, Afrique sub-saharienne, expérimentations de longue durée, modèles évolution stock C, modèle QUEFTS, carbone résistant, pratiques culturales.

Abstract

The study was carried out in a cotton production area of Togo to analyze soil fertility dynamics under different agricultural management practices. We used (i) soil data and observed crop yield information during 20 to 40 years from experiments in controlled conditions, (ii) soil data collected under on-farm plots and (iii) information reported by farmers throughout interview. Soil C and nutrients concentrations were determined several times during each long-term experiment period. Soil hydrolyzed C acid resistant and its mineralization were determined from soil samples taken at the last year of two long-term experiments. Tree soil C models of varying complexity were tested and the most accurate in terms of soil C dynamics description in these tropical soils was coupled with the QUEFTS model (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) and with mineral partial balance to analyze the effect of agricultural management practices on soil fertility dynamics. Results indicated that, although fertilizer N, P and K were continuously applied at a recommended rate by research (RR) or at a higher rate (1.5RR), initial cotton and cereals yields of 1.5 to 2 and 2 to 3 t ha⁻¹, respectively, decreased by typically 1 t ha⁻¹ after 20 years of soil cultivation. Crop yield depression was associated with a degradation of soil fertility indicators. In the upper soil 20 cm, soil C stock of 15 to 39 t ha⁻¹ after vegetation clearance dropped faster during the first years to reach equilibrium after only 10-15 years of soil cultivation. Such a decrease was less linked to soil C input. Although C input to soil differed between treatments (nil for some ones), a rapid decline in soil C contents did not significantly differ from one treatment to another. Soil N stock decreased also in all sites and was strongly correlated with the decrease in soil C ($r = 0.93$). Thus, the effect of N fertilizer application was totally absent on soil N stock level. In Ferralsol for example, a decrease in soil potential to supply N as calculated with QUEFTS model was 38-49% after five years of cultivation. While NPK fertilizer was applied at 1.5RR during 20 years, a decrease of soil pH was tripled as compared with that of the treatment without mineral fertilizer application. Because of this soil acidification and soil C content decline, soil potential to supply P after five years decreased in 25 to 59%; in spite of the fact that total soil P was maintained in most experimental sites. In areas with two cropping cycles per year, because of application frequency, NPK fertilizer at RR or 1.5RR maintained soil K exchangeable, while a decrease in soil exchangeable Ca and Mg was respectively 20 and 40% more pronounced, as compared with treatment without fertilizer. Such controversy dynamic induced by NPK fertilizer application resulted in ratios between exchangeable cations that became out of optimal values.

Soil C dynamics observed were accurately described with a two-pool C model running on an annual time step basis. Calibrated decomposition rate of labile soil C was in the range of 0.15 to 0.24 and stable soil C pool represented 33 to 67% of initial total soil C stock. Soil C that was resistant for hydrolyze acid was about 30% of this total initial soil C stock, which was lower than the simulated stable C pool. Both simulation and hydrolyze acid methods revealed high resistant C pool in these soils, which presumably explains their fragility. Simulated addition of organic matter to the soil indicated that additions of not lower than 3.5 t C ha⁻¹ year⁻¹ for 15 to 20 years would be necessary to build threshold soil C stocks of about 11 to 13 t ha⁻¹, compatible with positive crop response to fertilizer. A feasibility of such practices is less realistic. As observed on station, a degradation of soil fertility indicators was also pronounced under on-farm plots. A decrease in cotton cropping that facilitates farmers' access to agricultural inputs, resulted in a decrease in mineral fertilizer application. Except for northern Togo where farmers recessed organic amendment with compost, new soil fertility management methods were not reported. Crops, such as cassava, that was less sensitive to climatic risk and for that current soil fertility level allows obtaining yield that may balance their production-cost, were adopted or intensified by several farmers.

Overall, this study concluded that agriculture management practices tested in station as well as the traditional practices did not maintained soil fertility in long-term. Association of Ca/Mg and NPK at a recommender rate would be a promising option to achieving a sustainable management of mineral fertility of these soils. Minimum tillage associated with external C input would be an asset to a sustainable management of organic fertility of these soils.

Keywords: Tropical soil fertility; Sub-Saharan Africa; Long-term experiment; Soil C model ; Model QUEFTS; Resistant C; Agriculture management practices.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	6
Introduction	6
I. Fonction du sol et déterminants de sa fertilité	7
1.1. Fonction du sol	7
1.2. Déterminants de la fertilité du sol	8
1.2.1. Matière organique	9
1.2.2. Eléments minéraux du sol	11
1.2.3. Structure et texture du sol.....	16
II. Caractérisation et modélisation de l'évolution du stock de C du sol.....	16
2.1. Structure en fractions de la matière organique du sol	16
2.2. Fractionnement de la matière organique	17
2.2.1. Fractionnement chimique	17
2.2.2. Fractionnements physiques	19
2.3. Modèles d'évolution du stock de C du sol	20
CHAPITRE 2 : CADRE GÉNÉRAL ET METHODOLOGIE DE L'ÉTUDE.....	23
Introduction	23
I. Cadre général de l'étude	23
1.1. Contexte climatique du Togo	23
1.2. Sol et relief	27
1.2.1. Zone pré-littorale et littorale	28
1.2.2. Ensemble hydromorphologique du mono	28
1.2.3. Zone montagneuse subhumide de l'Atakora moyen et méridional.....	28
1.2.4. Zone montagneuse sèche de l'Atakora septentrional	28
1.2.5. Ensemble hydro-morphologique de l'Oti.....	28
1.2.6. Savane sèche continentale du Nord.....	28
1.3. Population.....	29
1.4. Agriculture	29
1.4.1. Grandes aire de production des différentes cultures et d'élevage	30
1.4.2. Systèmes de production agricole.....	31

II. Méthodologie.....	33
2.1. Sites de collecte de données.....	33
2.1.1. Points de recherche en conditions contrôlées.....	33
2.1.2. Zone et approche d'enquêtes en milieu paysan et collecte de données de sol sur des parcelles paysannes.....	36
2.2. Données.....	37
2.2.1. Natures et méthodes d'analyses des paramètres de sol.....	37
2.3. Analyse des données.....	45
 CHAPITRE 3 : MODELES D'ÉVOLUTION DU STOCK DE C DES SOLS CULTIVÉS EN ZONE COTONNIÈRE DU TOGO ET CARACTÉRISATION DU COMPARTIMENT STABLE DE C DU SOL	46
I. Article: Carbon losses and primary productivity decline in savannah soils under cotton-cereal rotations in semiarid Togo.....	48
1. Introduction.....	49
2. Materials and methods.....	51
2.1. Site characterisation.....	51
2.2. The long-term experiments.....	52
2.3. Soil carbon models.....	54
2.4. Data collection and model parameters.....	55
2.5. Model calibration, testing and scenario analysis.....	56
3. Results.....	58
3.1. Long-term changes in crop productivity and C inputs to the soil.....	58
3.2. Soil carbon dynamics.....	60
3.3. Model sensitivities and scenario exploration.....	64
4. Discussion.....	66
II. Compartiment de C du sol résistant à l'hydrolyse acide et vitesse de minéralisation de C du sol évaluée par incubation.....	69
2.1. Importance relative des fractions de sol et quantité résistante de C.....	69
2.2. Conditions initiales de la parcelle expérimentale de Kolokopé à la défriche.....	72
2.2.1. Hétérogénéité spatiale de la parcelle et difficultés relatives à l'utilisation de données synchroniques de sol.....	72
2.2.2. Vitesse de minéralisation de C et implications sur les résultats de la modélisation.....	73

CHAPITRE 4 : EFFET DE LA FERTILISATION MINERALE AVEC RESTITUTION AU SOL DES RESIDUS DE RECOLTE SUR L'ÉVOLUTION A LONG TERME DES CONCENTRATIONS DU SOL EN C ET NUTRIMENTS..... 77

Article: Long-term mineral fertiliser use and crop residue restitution do not compensate for carbon and nutrient losses from a Ferralsol under continuous cultivation..... 77

1. Introduction	79
2. Materials and methods	80
2.1. Experimental site	80
2.2. Long-term experiment.....	81
2.3. Laboratory analysis	82
2.4. Data analysis	83
2.5. Crop yields and partial nutrient balances	84
2.6. Simulating nutrient supply and crop responses.....	85
3. Results	87
3.1. Long-term changes in crop productivity, soil carbon input and nutrient uptake	87
3.2. Effect on soil fertility indicators.....	90
3.3. Modelling long-term changes in soil stocks and concentrations.....	93
3.4. Modelling potential soil nutrient supply and crop responses	95
4. Discussion	98
5. Conclusions	102

CHAPITRE 5 : EFFET DE LA JACHÈRE DE COURTE DURÉE SUR L'ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE CARBONE ET DE NUTRIMENTS DU SOL 104

1. Introduction	104
2. Matériel et méthode.....	104
2.1. Site expérimental.....	104
2.2. Dispositif expérimental	104
2.3. Analyse des données	106
3. Résultats	108
3.1. Effet de la jachère de courte durée sur les rendements de culture	108
3.2. Effet de la jachère de courte durée sur l'évolution des concentrations de C et de nutriments du sol	110
3.3. Diagnostic de l'évolution du stock de C du sol.....	114
4. Discussion	118

CHAPITRE 6 : NOUVELLES ADAPTATIONS DE GESTION ET ÉVOLUTION DE LA FERTILITÉ DES SOLS CULTIVÉS EN MILIEU PAYSAN	121
Introduction	121
I. Quelques caractéristiques des exploitations agricoles et évolution des pratiques de gestion de la fertilité du sol en milieu paysan.....	122
1.1. Choix culturaux opérés par les agriculteurs en réponse à la baisse de la culture cotonnière.....	122
1.2. Taille des superficies et nombre de cultures à l'unité de l'exploitation agricole avant et après la baisse de la culture cotonnière	124
1.3. Gestion de la fertilité du sol en milieu paysan après la baisse de la culture cotonnière.	124
1.4. Diagnostic de l'impact de l'abandon de la fertilisation minérale par certains agriculteurs sur les rendements de cultures.....	128
II. Indicateurs de la fertilité de sol sur des parcelles paysannes.....	128
2.1. Historique de parcelles paysannes dont les indicateurs de la fertilité de sol ont été déterminés.	128
2.2. Forte hypothèse d'un stock élevé et variable de C stable sur les parcelles paysannes...	130
2.3. Evolution des indicateurs de la fertilité du sol sur les parcelles paysannes	131
Conclusion générale, insuffisances et perspectives.....	133
Références citées	141
Annexes	168

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Table 1 : Variabilité mensuelle de l'évapotranspiration, d'ensoleillement, de la vitesse du vent et de l'humidité relative moyenne de l'air dans les régions du Togo	26
Table 2: Position géographique et caractéristiques indicatives du sol des points de recherche en conditions contrôlées	35

Chapitre 3

Table 1: Average soil characteristics at both sites at the start of the experiment	51
Table 2: Experimental factors and management practices tested at Elavagnon	52
Table 3: Experimental factors and management practices tested at Dalanda	53
Table 4: Model parameters obtained through calibration against observed soil C changes over 30 years	61
Table 5: Statistic ratios indicated a quality of adjustment between models soil C simulated and measured.....	63
Table 6: Sensitivity of the three models calibrated for Elavagnon and Dalanda to 10% changes in their parameter values; sensitivities were calculated for simulation runs of 30 years	63
Table 7: Exploration of scenarios of threshold soil C restoration with annual applications of increasing rates of plant materials	65
Table 8 : Fractions de la terre fine et teneurs en C et N (Elavagnon et Dalanda).....	69
Table 9 : Capacité au champ (CAPAC), quantités initiale (Qi) et minéralisée (Qm) de C lors de l'incubation (Kolokopé)	73

Chapitre 4

Table 1: Soil characteristics at the onset of the experiment at Kouvé	81
Table 2: Range (min-max) of nutrient concentrations in crops used in the study	84
Table 3: Average carbon input to the 20 cm topsoil layer, N, P and K uptake from the soil and partial N, P and K balances (calculated from yield data and according to the crop biomass	

management strategy, which consisted of leaving maize straw in the plots, uprooting and burning cotton plants in the plots after harvest).....	89
Table 4: Calibrated parameter values of the AMG model and of the single exponential decline that optimised the fit between observed and simulated soil C and N stocks ($t\ ha^{-1}$) in the 0-20 cm topsoil	93
Table 5: Calibrated parameter values of the single exponential decline that optimised the fit between observed and simulated nutrient concentrations in the 0-20 cm topsoil layer	94
Table 6: Average potential soil N, P and K supply (SN, SP, SK, respectively, in $kg\ ha^{-1}$) as calculated with QUEFTS for the first five years and for the rest of the experiment.....	95
Table 7: Partial relative sensitivities of predicted maize yields to 10% changes in N, P or K application rates and soil pH	97

Chapitre 5

Table 1 : Traitements et succession culturale (A), apport de fertilisants minéraux et gestion des résidus de récolte (B), essai durée de jachère de Toaga.....	105
Table 2 : Productions totales, exportations minérales à travers les récoltes, bilan minéral apparent et quantités de carbone retournant au sol durant toute la période expérimentale à Toaga.....	110
Table 3 : Exploration de l'évolution du stock de C du sol suite aux apports externes de C, après 41 ans de mise en culture	116

Chapitre 6

Table 1 : Importance relative des cultures et évolution des superficies emblavées à l'unité de l'exploitation agricole	123
Table 2 : Gestion en milieu paysan de la fertilité du sol, disponibilité et accessibilité à l'espace agricole.....	125
Table 3 : Historique cultural de parcelles paysannes caractérisées à partir des analyses de sol.	129

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1 : Effet du stock de C et/ou du pH sur les différentes formes de P du sol.	14
Figure 2 : Schéma illustrant l'effet de la variation du stock de C et/ou du pH du sol sur les mouvements de K.....	15

Chapitre 2

Figure 1 : Evolution interannuelle de la pluviométrie (a et b) et répartition mensuelle de la moyenne des trente dernières années dans les régions Maritime, Plateaux, Centrale, Kara et des Savanes	24
Figure 2 : Evolution interannuelle de la température et répartition mensuelle de la moyenne des trente dernières années.....	26
Figure 3 : Carte des zones agro-écologiques, régions administratives et nombre de saisons agricoles	27
Figure 4 : Localisation géographique des points de recherche et villages d'enquête dans les différentes zones agro-écologiques	34
Figure 5 : Répartition intra-annuelle de la pluviométrie sur les points de recherche en conditions contrôlées entre 1977 et 2010.....	35
Figure 6 : Schéma analytique de C du sol résistant à la minéralisation	39
Figure 7 : Points et mode d'échantillonnage de sol sur la parcelle expérimentale de Kolokopé..	41
Figure 8 : Détermination de la capacité des échantillons de sol	43
Figure 9 : Détermination de la quantité et de la composition isotopique de C minéralisé lors de l'incubation de l'échantillon de sol	44

Chapitre 3

Figure 1: Yields of seed-cotton, and grain yields of sorghum and maize for all treatments over the entire period of experimentation at Elavagnon and Dalanda.	58
--	----

Figure 2: Cumulative carbon inputs to the soil calculated from yield data, biomass production and crop residue management practices; Rotation experiment at Elavagnon (1977-2005); Fertilization experiment at Dalanda (1974-2005).	59
Figure 3: The relationship between seasonal rainfall and crop C inputs to the soil calculated from biomass production data and crop residue management at Elavagnon (1977-2005). The logistic model ($Y = 4.66 - 6.51 \times 0.99^x$) was fitted to the observations falling on the upper boundary, representing the potential contribution of C to the soil via crop residues as determined by rainfall	60
Figure 4: Observed and simulated long term changes in soil C stocks at Elavagnon and Dalanda under the various rotation and fertilizer treatments evaluated.....	62
Figure 5 : Importance relative de C total dans les fractions de la terre fine et relation entre C-associé à la fraction < 50 µm et le taux d'argile + limon.....	70
Figure 6 : Proportion de C-résistant et C-hydrolysé dans le C-associé à la fraction de sol inférieure à 50 µm et comparaison de C-résistant à C-total à différents âges de culture.....	71
Figure 7: Répartition spatiale des concentrations de C sur la parcelle expérimentale de Kolokopé.	72
Figure 8 : Quantité de C minéralisé et évolution de la vitesse de minéralisation.	74

Chapitre 4

Figure 1: Total annual, first season and second season rainfall collected at the experimental site.	81
Figure 2: Maize grain and seed-cotton yields under different mineral fertiliser application regimes over the entire experimental period. Maize was grown in the first rains season and cotton in the second.....	87
Figure 3: The relationship between maize grain and seed-cotton yields and seasonal rainfall under different mineral fertiliser application regimes over the entire experimental period. Maize was grown in the first rains season and cotton in the second.....	88
Figure 4: Long term changes in soil organic C, total N, available P and pH under the four experimental treatments.	90
Figure 5: Long term changes in the cation exchange capacity and exchangeable cations under the four experimental treatments.....	91

Figure 6: A comparison of measured and predicted yields of maize using the model QUEFTS, for three treatments (Control without fertiliser [No-F], NPK fertiliser applied at recommended rates [RR] or at this rate increased in 50% [1.5RR]) , averaged for the first five, intermediate, and last five years of the experiment. All measured and predicted yields, irrespective of treatment, plotted against soil organic carbon.....	96
Figure 7: Simulation with the model QUEFTS of the response of maize to increasing rates of N in the presence of recommended rates of P and K in plots that underwent different fertiliser regimes during 2, 7, 12 and 17 years.....	98

Chapitre 5

Figure 1 : Evolution des rendements de cultures et des moyennes mobiles de 5 années consécutives de rendements de coton-graine	108
Figure 2 : Evolution des concentrations du sol en C, N et P durant la période expérimentale. ...	111
Figure 3 : Evolution des concentrations de bases échangeables durant la période expérimentale.	113
Figure 4 : Simulation de l'évolution du stock de C du sol avec le modèle AMG.....	114
Figure 5 : Relation entre le Root Mean Square Error (RMSE) et le coefficient de minéralisation de C labile du sol (K_2) en fonction du coefficient isohumique de C (K_1) et des entrées C au sol (M)	115
Figure 6 : Diagnostic de l'impact des apports externes de C sur l'évolution du stock de C du sol à différentes périodes de la mise en culture du sol	117

Chapitre 6

Figure 1 : charrette d'âne servant à la mesure de fumier ou de compost au nord du Togo..	126
Figure 2 : Evolution des concentrations de C et de nutriments sur des parcelles paysannes.....	132

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Données relatives à l'essai dose de fertilisation minérale et restitution au sol de la paille de maïs conduit en terre de barre à Kouvé.	168
Annexe 1.1 : Rendements de cultures	168
Annexe 1.2 : Données de sol de la profondeur 0-20 cm.	168
Annexe 2 : Données relative à l'essai jachère de courte durée conduit en sol hydromorphe à Toaga.	174
Annexe 2.1 : Rendements de cultures.	174
Annexe 2.2 : Données de sol de la profondeur 0-20 cm.	175
Annexe 3 : Données relatives à l'essai fertilisation minérale conduite en sol ferralitique à Dalanda.....	177
Annexe 3.1 : Rendements de culture.....	177
Annexe 3.2 : Données de sol Figure.	178
Annexe 4 : Données relatives aux différentes rotations culturales comparées en sol ferrugineux à Elavagnon.	182
Annexe 4.1 : Rendements de cultures	182
Annexe 4.2 : Données de sol.....	183
Annexe 5 : Nouveau dispositif expérimental installé en vertisol à Kolokopé.	187
Annexe 5.1 : Protocole expérimental.	187
Annexe 5.2 : Repérage des points de prélèvement d'échantillons de sol.	188
Annexe 5.3 : Données initiales de sol Figure.....	189
Annexe 5.4 : Plan parcellaire.	190
Annexe 5.4 : Rendement en coton-graine à la première année expérimentale.	191

SIGLES ET ABREVIATIONS

[.] = Concentration

AFNOR = Association Française de Normalisation

AGB = Above Ground crop Biomass

AGRA= African Green Revolution Alliance

Al = Aluminium

AMG = Modèle d'évolution du stock de carbone du sol proposé par Andriulo, Mary et Guerif

BGB = Below Ground crop Biomass

BIO = Microbial Biomass

C = Carbone

Ca = Calcium

CAPAC = Capacité au champ

CEC = Capacité d'Echange Cationique du sol

CEDEAO = Communauté Economique des Etats de L'Afrique de l'Ouest

CIRAD = Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

C_{lab} = Carbone labile du sol

CNUCED = Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement

CO₂ = Dioxyde de carbone

Cr = Carbone du sol résistant à la minéralisation

CRA-CF = Centre de Recherche Agronomique Coton et Fibre du Bénin

CRA-L = Centre de Recherche Agronomique du Littoral

CRA-SH = Centre de Recherche Agronomique des Savanes Humides

C_{st} = Carbone stable

CV = Coefficient de variation

DPM = Decomposable Plant material

DSID = Direction des Statistiques, de l'Information et de la Documentation

DSP = Direction de Soutien à la Production cotonnière

E2S = Environnement, Santé/STIC

EF = Model Efficiency

ESA = Ecole Supérieure d'Agronomie (Université de Lomé)

ETP = Evapotranspiration

FAO = Food and Agriculture Organisation

FNGPC = Fédération Nationale des Groupements de Producteurs de Coton
 GPC = Groupements de Producteurs de Coton
 H = Hydrogène
 HCl = Acide Chlorhydrique
 HD = Modèle d'évolution du stock de carbone du sol proposé par Hénin et Dupuis
 HDR = Habilité à Diriger la Recherche
 HI = Harvest Index
 HUM = Humified Organic Matter
 ICP = Inductive Couplet Plasma
 IFDC = International Fertilizer Development Center
 INRAB = Institut National de Recherche Agronomique du Bénin
 IOM = Inert Organic Matter
 IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change
 ITRA = Institut Togolais de Recherche Agronomique
 K = Potassium
 K_1 = Coefficient isohumique de la matière organique
 K_2 = Taux de minéralisation annuel de carbone humique du sol
 MAEP = Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche
 Mg = Magnésium
 MO = Matière Organique
 MOS = Matière Organique du Sol
 N = Azote
 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ = Pyrophosphate de Sodium
 NaOCl = Hypochlorite de Sodium
 NSCT = Nouvelle Société Cotonnière du Togo
 P = Phosphore
 PIB = Produit Intérieur Brut
 PNUD = Programme des Nations Unies pour le Développement
 QUEFTS = Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils
 QV = Quotient of variances
 RDF = Root Distribution Factor
 RMSE = Root Mean Squared Errors
 Roth C = Rothamsted soil carbon model
 RPM = Resistent Plant Material

RSR = Root:Shoot Ratio

SCAC = Service de Coopération et d'Action Culturelle

SK = Soil potential native to supply Potassium

SN = Soil potential native to supply Nitrogen

SOM = Soil Organic Matter

SOTOCO = Société Togolaise de Coton

SP = Soil potential native to supply Phosphorus

STAM = Variété de coton créée à la Station Anié Mono (Togo)

TOC = Total Organic Carbon

UCGPC = Union Cantonale des Groupements de Producteurs de Coton

UMR = Unité Mixte de Recherche

UPGPC = Union Préfectorale des Groupements de Producteurs de Coton

URGPC = Union Régionale des Groupements de Producteurs de Coton

URSCA = Unité de Recherche Systèmes de Culture Annuels

USA = United State of America

Introduction générale

Pendant une période d'environ 30 ans, la perte de la productivité agricole de 200 millions d'hectares de terres cultivées avait été observée à travers le continent africain (Sanchez et *al.*, 1997). En Afrique Subsaharienne, cette dégradation généralisée de la fertilité des sols est l'une des principales causes de la faible productivité agricole et de l'insécurité alimentaire (Pieri, 1989 ; Stoorvegel et *al.*, 1990 ; de Ridder et *al.*, 2004). Dans cette partie d'Afrique, l'effet de la dégradation de la fertilité des sols avait été perçu en culture cotonnière dès 1990 à travers l'apparition des symptômes foliaires liés aux carences en K et Mg des sols cultivés (Suzor, 1991 ; Fesneau, 2004). Dans le cas du Togo, la dégradation des sols cultivés est illustrée par l'évolution des rendements de coton-graine. Avant la création en 1974 de l'institut chargé d'intensifier et de valoriser la filière cotonnière (Société Togolaise de Coton-SOTOCO¹), le coton était produit pour des besoins essentiellement domestiques sans apports réels d'engrais minéraux et les rendements en coton-graine avoisinaient 0,7 t ha⁻¹ (Schwartz, 1982). Par la suite, et grâce à la fertilisation minérale et à la mise en place de variétés productives (STAM), les rendements de coton-graine ont été améliorés. Entre 1983 et 1990, les rendements moyens au niveau national atteignaient en années de bonne pluviosité 1,4 t ha⁻¹ et environ 1 t ha⁻¹ lorsque la pluviométrie est mauvaise. Ces rendements figuraient parmi les meilleurs en Afrique Subsaharienne (CNUCED, 2008). Après cette période, les rendements de coton-graine au Togo connaissent de fortes baisses et retrouvent les niveaux obtenus vers les années 60, sans fertilisation minérale. Les moyennes nationales de coton-graine ont été de 0,87 et 0,98 t ha⁻¹ en 2000 et 2005 respectivement et ne représentaient que 54% de la moyenne mondiale à l'époque (1,93 t ha⁻¹ ; CNUCED, 2008). La baisse des rendements de coton-graine telle que observée au Togo n'est pas un cas spécifique mais un problème général à l'Afrique. En 2005, les rendements moyens de coton-graine au Bénin, au Burkina Faso, au Mali et au Cameroun étaient du même ordre de grandeur que celui du Togo et étaient même plus faibles dans d'autres pays de la sous-région, 0,63 t ha⁻¹ au Tchad puis au Nigéria (CNUCED, 2008). L'effet de la dégradation de la fertilité des sols a été également observé à travers l'évolution des rendements de céréales au Burkina Faso (Sedogo, 1993). En système de production sans fertilisation et exportation des résidus de récolte, les rendements de sorgho sont passés de 1660 kg ha⁻¹ à la première année après la défriche à 250-150 kg ha⁻¹

¹ La SOTOCO est actuellement connue sous la dénomination : Nouvelle Société Cotonnière du Togo (NSCT).

dès la deuxième année pour devenir pratiquement nuls au bout de 15 années d'exploitation. Lorsque la fertilisation minérale avait été appliquée, ces rendements étaient plus élevés mais la baisse a été analogue à celle du témoin sans fertilisation.

La dégradation des sols se manifeste à travers la baisse des stocks de C, de minéraux et l'acidification des sols. En Afrique Subsaharienne, les études ont unanimement rapporté la baisse du stock de C des sols cultivés (Feller et Milleville, 1977a ; Swift et Wooster, 1993 ; Staben *et al.*, 1997 ; Deen et Kataki, 2003). Dans le cas du Nord-Togo, Pieri (1989) a rapporté des teneurs du sol en C de 3,5 g kg⁻¹ sur les parcelles en culture, contre 5 g kg⁻¹ sur celles non-cultivées. Hien (2004) a également rapporté des évolutions analogues au Burkina Faso (2,97 vs. 4,81 g C kg⁻¹). Les stocks minéraux des sols cultivés baissent aussi fortement. Bekunda *et al.* (1997) ont rapporté sur des sols en culture des baisses annuelles des stocks de N et P de 55 et 6 kg ha⁻¹ respectivement. Solomon *et al.* (2007) ont noté des taux de baisse annuelle du stock de N allant de 14 à 23%. Les calculs de bilans minéraux effectués par Stoorvegel *et al.* (1990) et par Smaling *et al.* (2002) sont négatifs pour l'Afrique Subsaharienne (-22, -3 et -15 kg ha⁻¹ an⁻¹ de N, P et K respectivement) et sont indicatifs de ces baisses de stocks minéraux. En zone tropicale, les pluies ont induit de fortes érosions en raison des couverts végétaux qui sont peu denses sur les parcelles cultivées (Bationo *et al.*, 2004). L'acidification du sol, avec l'apparition des ions indésirables tels que Al³⁺ et Mn²⁺, a été partout observée en Afrique Subsaharienne (Pieri, 1989 ; Sedogo, 1993).

La dégradation des sols en Afrique résulte essentiellement des pratiques traditionnelles inappropriées, de la croissance démographique et de l'enlisement au cours de ces dernières années des institutions en charge de la filière cotonnière. L'exportation quasi-totale des résidus de récolte à travers le brûlis, la vaine pâture, leur usage en combustion domestique et la faible restitution minérale au sol (moins 9 kg ha⁻¹ d'engrais contre 160 kg ha⁻¹ en Asie ; FAO Stat, 2010) ont été évoquées parmi les principales causes de la baisse de la fertilité des sols (Elliott and Papendick, 1986 ; Bekunda *et al.*, 1997 ; Bationo *et al.*, 2004 ; Rufino *et al.*, 2007a). L'explosion démographique a entraîné la surexploitation des terres et de fortes pressions sur les ressources naturelles. Au Togo, l'agriculture itinérante qui suppose que l'exploitant agricole dispose d'au moins quatre fois plus d'espace agraire qu'il n'en mette annuellement en valeur, a disparu dans certaines régions et est fortement réduite par ailleurs. Harmand *et al.* (1998) au Cameroun et Masse *et al.* (1998) au Sénégal ont également rapporté la diminution des superficies en jachère et de leur durée. Particulièrement, la crise cotonnière

en Afrique de l'Ouest et la crise énergétique² mondiale, exacerbent la baisse de la fertilité des sols dans la région. En effet, c'est essentiellement à travers la filière coton que les agriculteurs de ces pays accèdent aux crédits intrants agricoles. Une partie du crédit engrais acquis dans ce cadre, sert à fertiliser frauduleusement les céréales et à améliorer leurs rendements à travers l'arrière effet des engrais appliqués en culture cotonnière. Depuis près d'une décennie, les institutions africaines en charge de la filière coton éprouvent de difficultés financières à cause de l'évolution défavorable³ des cours mondiaux et de leur incapacité à concurrencer le marché mondial de coton, dominé par la Chine et USA. Il en a résulté la baisse du prix d'achat de coton-graine au producteur, des retards de paiement de leurs recettes, les dettes et le dysfonctionnement des groupements de producteurs. Dans ce contexte, la plupart des agriculteurs ont abandonné la culture cotonnière et ont, à l'évidence, vu leurs moyens de maintien de la fertilité des sols fortement baissés.

La compréhension des phénomènes régissant l'évolution de la fertilité des sols sous culture est complexe et ne paraît évidente qu'à travers des données d'expérimentations conduites sur une période assez longue (Roussel et *al.*, 2001). De tels dispositifs sont rares en Afrique de l'Ouest et quasi inexistantes en Afrique Centrale (Bekunda et *al.*, 1997 ; Hien, 2004). Le Togo est l'un des pays de l'Afrique de l'Ouest où ces expérimentations avaient été conduites et dans des contextes pédoclimatiques bien diversifiés. Cependant, les données n'avaient pas été exploitées et sont restées dans la littérature grise. Les informations relatives aux expérimentations de longue durée sont en général élucidées, quantifiées et extrapolées à travers la modélisation (Jenkinson et *al.*, 1987 ; Verberne et *al.*, 1990 ; Van Keulen, 2001). Le modèle peut être perçu comme une expérimentation virtuelle qui informe au-delà de ce qui est observé à travers une expérimentation réelle. Toutefois, l'exactitude des résultats prédits ou extrapolés à travers la modélisation, réside dans la qualité avec laquelle le modèle décrit la phase observée du phénomène étudié. Dans le cas de l'évolution du stock de C des sols cultivés, plusieurs modèles ont été proposés et certains peuvent s'avérer plus performants que d'autres (Smith et *al.*, 1997). La performance des modèles d'évolution du stock de C du sol mérite d'être particulièrement questionnée en zone tropicale ; puisque ces modèles ont été

² Hausse du prix des intrants agricoles. Au Togo, le prix CAF du kg d'engrais NPK, d'urée et du litre d'insecticide était de 137, 95 et de 3040 F CFA respectivement en 1999. Ils sont passés à 203, 195 et 5148 FCFA en 2003 ; soit des hausses respectives de 48, 105 et 63%.

³ Baisse du prix de coton-fibre et augmentation du prix des engrais.

pour la plupart proposés à partir des données observées en zone tempérée où les conditions pédoclimatiques sont très différentes.

L'objectif de ce travail a été d'analyser l'évolution de la fertilité du sol sous différentes pratiques culturales en zone cotonnière du Togo. Spécifiquement l'étude vise : (1) à déterminer les modèles permettant de mieux décrire l'évolution observée du stock de C de ces sols tropicaux, (2) tester en milieu réel l'applicabilité des modèles paramétrés en station, (3) analyser l'effet de la dose de fertilisation minérale, de la restitution de résidus de récolte au sol, de la nature/durée de jachère et des rotations culturales sur l'évolution à long terme des indicateurs de la fertilité du sol, (4) recenser et diagnostiquer les impacts des nouvelles adaptations de gestion de la fertilité des sols, opérées par les agriculteurs dans le contexte de l'abandon/diminution de la culture cotonnière et (5) proposer des approches qui atténueraient la baisse des stocks de C et de minéraux des sols cultivés. Pour y parvenir, l'étude a utilisé (i) des données relatives aux expérimentations de longue durée conduites en conditions contrôlées sur les points de recherche de l'Institut Togolais de Recherche Agronomique (ITRA), (ii) des données de sols observées sur des parcelles paysannes (conditions non-contrôlées) et (iii) des données d'enquêtes conduites en milieu paysan. Des analyses spécifiques telles que l'hydrolyse acide et l'incubation ont été réalisées pour étayer les enseignements obtenus des anciennes données existantes. Un nouveau dispositif expérimental qui teste des techniques potentielles non étudiées dans le cas des anciens dispositifs expérimentaux a été mis en place.

Nos travaux sont basés sur l'hypothèse que les données observées à travers les expérimentations de longue durée en zone cotonnière du Togo permettraient d'expliquer la fragilité et la dégradation de la fertilité des sols cultivés. Spécifiquement l'étude estime que, parmi les modèles d'évolution de la fertilité des sols existants dans la littérature, certains s'adaptent mieux en zone tropicale que d'autres. Ensuite, l'incapacité des sols tropicaux à soutenir dans le long terme la productivité agricole ne s'explique pas seulement par la baisse rapide du stock de C et des minéraux, mais également par une fraction importante de C stable qu'ils contiennent. Enfin, l'augmentation des doses de fertilisants minéraux et la restitution au sol de résidus de récolte ne permettent pas de maintenir la fertilité des sols tropicaux sous culture. Les résultats attendus de la présente étude sont de trois ordres. L'évolution de la fertilité des sols cultivés est modélisée et les causes de sa rapide dégradation sont mieux comprises. De nouvelles techniques permettant d'atténuer la dégradation de la fertilité des sols sont proposées.

Le document est structuré en 6 chapitres. Le premier chapitre synthétise de la bibliographie sur les déterminants de la fertilité du sol et sur les phénomènes susceptibles de les améliorer ou au contraire de les dégrader. Il discute les avantages et inconvénients relatifs aux méthodes de caractérisation de la matière organique du sol. Le deuxième chapitre présente le contexte pédoclimatique et le cadre de la production agricole au Togo. Il présente les conditions spécifiques aux différents sites où les expérimentations ont été conduites et décrit la méthode d'analyse des données utilisée. Le troisième chapitre applique des modèles de complexité variable aux données de deux expérimentations conduites sur deux sites et identifie les modèles qui décrivent mieux l'évolution observée du stock de C du sol en zone cotonnière du Togo. Il confronte les résultats de la modélisation à ceux de l'hydrolyse acide et de l'incubation. Le modèle le plus performant ainsi déterminé a été couplé aux observations relatives à d'autres expérimentations conduites sur des sites différents, pour analyser et explorer l'effet de la dose de fertilisation minérale et de la durée de jachère (avec restitution ou non des résidus de récolte au sol) sur la stabilité des rendements et sur l'évolution des indicateurs de la fertilité du sol (chapitres 4 et 5). Enfin, le dernier chapitre présente le contexte actuel de la gestion de la fertilité des sols en milieu paysan et confronte l'évolution de la fertilité du sol telle que observée en station à celle observée sur des parcelles paysannes.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

Introduction

La fertilité du sol est l'un des domaines de l'agriculture où de nombreuses et variées études de recherche ont été effectuées. Dans les pays développés, les travaux de recherche sur la fertilité du sol ont commencé bien avant le 19^{ème} siècle. Dans les pays en développement et en Afrique en particulier, ces études n'ont pris de l'ampleur que tardivement (Pieri, 1989 ; de Ridder et *al.*, 2004). Manlay et *al.* (2007) ont scindé en trois phases les études relatives à la fertilité du sol et à la nutrition végétale. La période avant le 19^{ème} siècle a été caractérisée de connaissances rudimentaires, basées sur le bon sens sans expérimentations, et avait prôné l'humus comme l'unique déterminant la fertilité d'un sol. Tull (1733) et Hassenfratz (1792) avaient soutenu que les plantes se nourrissent uniquement de la fraction soluble de l'humus. Au milieu du 19^{ème} siècle, Liebig synthétisa les résultats de recherche de Thaër (1811-1816), Martin (1829) et de Grandeau (1879), pour établir le principe de la nutrition minérale des végétaux sans que le rôle fondamental de l'humus ait été négligé. Boulaïne (1995) a résumé en ces termes le principe prôné en cette deuxième phase : *‘Les plantes absorbent par leurs racines et par leurs feuilles des éléments chimiques à l'état de combinaisons simples. Les composés organiques du sol, notamment l'humus, ne sont que des réserves dont les constituants interviennent après leur dégradation à l'état d'éléments résiduels minéralisés’*. Ces éléments minéraux ôtés du sol doivent lui être restitués à travers des engrais. Cette phase donna ainsi naissance à une agriculture qui vise à accroître les rendements et à maintenir la fertilité du sol à travers des restitutions minérales et organiques. La troisième phase commença vers 1940 et vise, au-delà d'intensifier et de pérenniser la production, à préserver l'environnement (Manlay et *al.*, 2007). Cette phase a connu de très nombreux et variés travaux de recherche surtout lorsqu'il s'est avéré que les activités humaines, dont l'agriculture, contribuent au réchauffement climatique à travers les émissions de gaz à effet de serre et à la pollution des ressources naturelles telles que l'eau (Schlesinger et *al.*, 2000 ; IPCC, 2001). Les travaux de recherche en cette phase ont entre autre (i) caractérisé le C du sol, (ii) analysé et expliqué la dynamique de son stock dans le sol et (iii) évalué son impact sur l'environnement.

L'objectif de ce chapitre est de faire l'état des connaissances justifiant la méthodologie adoptée dans la présente étude et qui permettent de comprendre, analyser puis expliquer l'évolution observée de la fertilité du sol en zone cotonnière au Togo.

I. Fonctions du sol et déterminants de sa fertilité

1.1. Fonctions du sol

Le sol d'une part et le climat d'autre part sont les principales composantes du milieu qui déterminent la production végétale. Le climat fournit en excès ou en défaut (très rarement à l'optimum) de l'énergie, du dioxyde de carbone, de l'eau et de la chaleur que le sol doit régulariser pour un bon développement et une bonne production des végétaux. De Kimpe (2003) et Lilia (2004) ont ainsi résumé en quatre principaux points les fonctions du sol dans le processus de production végétale :

- (i) le sol est la source essentielle de minéraux dont se nourrissent les végétaux et de matière organique⁴ (MO) dont l'activité est indispensable au développement et à la production des végétaux. Le sol régit les phénomènes de décomposition des organismes morts (végétaux et animaux) et d'altération de la roche mère qui participent au renouvellement naturel des stocks de MOS et de nutriments ;
- (ii) le sol élimine l'excès d'eau par percolation et s'oppose au déficit à travers la rétention d'eau dans les feuilles d'argile et de MO pour ainsi constituer un stock optimal au développement de la culture ;
- (iii) le sol exerce un pouvoir tampon, en s'opposant aux variations brutales et excessives de la température et de la composition minérale. Il maintient ainsi la température et le pH à l'optimum-vital pour les végétaux et pour la faune microbienne ;
- (iv) le sol, en facilitant la circulation de l'air, constitue un milieu idéal de vie aux végétaux et aux microorganismes.

Ce sont là autant de fonctions qu'un sol doit assumer pour une croissance harmonieuse et une production soutenue des cultures. La fertilité d'un sol est donc sa potentialité à assumer pleinement les diverses fonctions de fourniture de nutriments, de l'eau et le maintien des conditions optimales de température, d'oxygène et du pH. Feller (2003) définit la fertilité du sol comme son état en ce qui concerne la quantité et la disponibilité des éléments essentiels à

⁴ La matière organique du sol (MOS) est le plus souvent assimilée au carbone (C), au point que les laboratoires d'analyse obtiennent le taux de MOS en appliquant un coefficient multiplicateur au taux de C déterminé : $MOS = 1,72 * C$. Dans la suite de ce document, les deux termes ont été à cet effet utilisés de façon concomitante.

la croissance des plantes. Trichet et *al.* (1999) définissent le même terme comme étant la somme des facteurs physiques, chimiques et biologiques déterminant l'aptitude du sol à soutenir une production. Selon Morel (1989a), la fertilité d'un sol est la facilité avec laquelle la racine végétale peut bénéficier dans ce sol des facteurs suffisants de croissance : chaleur, eau, éléments chimiques et organiques. Ces trois définitions se recoupent pratiquement et définissent la fertilité du sol sans spécifier le type de culture que le sol supporte. Un sol fertile serait propice à la production de toutes les cultures.

La fertilité des sols sous culture baisse en général et sa restauration est parfois difficile, notamment lorsque ce sont les fonctions biologiques et physiques qui sont affectées (Gupta and Germina, 1988 ; Paustian et *al.*, 1997 ; Dominy et *al.*, 2002). Par exemple, la perte de la fraction argilo-humique d'un sol induit inévitablement la perte de sa fraction minérale (Pieri, 1989). Ainsi, la dégradation de la fraction argilo-humique d'un sol est plus pernicieuse et sa restauration est plus difficile que celle d'un sol qui n'a perdu que la fraction minérale.

1.2. Déterminants de la fertilité du sol

Les principaux paramètres qui régissent la fertilité d'un sol sont : le taux de MOS, la richesse minérale du sol puis sa structure et sa texture (Larson et *al.*, 1992 ; Doran et *al.*, 1994). Les propriétés acido-basiques du sol (pH) et sa Capacité d'Echange Cationique (CEC) dépendent fortement des trois précédents paramètres et sont des indicateurs aussi pertinents à considérer dans l'appréciation de la fertilité d'un sol. Enfin, le rendement des cultures traduit à la fois le niveau de fertilité du sol, l'expression du climat puis dépend des techniques culturales et de la potentialité de la plante concernée à tolérer les conditions du sol et du milieu ambiant. Par exemple, lorsque l'agriculteur respecte le calendrier cultural, il améliore en général la production (Angers et *al.*, 1992). S'agissant du degré différent avec lequel les plantes tolèrent les conditions, le mil et le sorgho donnent de bons rendements en sols à fertilité médiocre contrairement au maïs et au cotonnier qui sont fortement sensibles à la déficience minérale et hydrique (de Rouw et *al.*, 2004). Le rendement de culture constitue donc un indicateur assez partiel de la fertilité du sol mais le plus précieux.

Les paragraphes suivants décrivent les rôles de la MOS, des éléments minéraux, de la texture et de la structure du sol et présentent les facteurs susceptibles de les améliorer ou au contraire de les dégrader.

1.2.1. Matière organique

Rôle

Dans la littérature, la MO est perçu comme le principal déterminant de la fertilité du sol. Ses rôles ont été abordés par des études aussi anciennes que récentes (Berzelius, 1839 ; Pichot, 1975 ; Cissé, 1986 ; Sedogo, 1993 ; Ouattara, 1994 ; Feller et *al.*, 1995b). La MOS (i) augmente la capacité de rétention et d'infiltration d'eau dans le sol, (ii) assure la stabilité structurale et participe à l'économie des cations échangeables à travers la formation de la CEC. Elle (iii) rend le sol meuble et facilite la pénétration des racines et (iv) améliore les propriétés acido-basiques du sol à travers ses effets positifs sur le pH. La minéralisation de la MOS constitue une source potentielle de N et P aux plantes cultivées. La MOS contient des hormones naturelles (auxines et gibberilline) qui améliorent la germination des graines, initialisent le développement et la potentialité des racines à absorber de nutriments (Schnitzer, 1986).

Relation entre le stock de C du sol et le rendement de culture

Bien que la MOS détermine fondamentalement la fertilité d'un sol, les rendements de cultures n'augmentent pas linéairement avec son stock (Bekunda et *al.*, 1997 ; Roussel et *al.*, 2001). Les rendements de cultures peuvent rester stables durant les 3-5 premières années qui suivent la défriche alors que le stock de MO aurait baissé pendant cette période (Sédogo, 1993). Cependant, le niveau du stock de C en-dessous duquel les rendements de cultures ne sont plus maintenus, est difficilement généralisable. Il dépend de la qualité de la MOS et de la potentialité de la culture à tolérer les conditions de stress hydrique et de température. Par exemple, l'oignon donne de bons rendements en sols sableux alors que le maïs et en particulier le cotonnier exigent des sols riches en MO et en éléments nutritifs. Par ailleurs, le niveau critique de C serait plus facilement atteint dans un sol à fort stock de C dont l'essentiel est stable que dans un sol au stock de C moyen dont l'essentiel se minéralise. Le dernier cas de sol pouvant mieux fournir que le premier des nutriments aux plantes cultivées. Ainsi, Pieri (1989) a noté la variabilité des stocks de C en deçà desquels la productivité des systèmes est difficilement assurée dans les agro-systèmes d'Afrique de l'Ouest. Feller (1995a) n'a toutefois lié le niveau critique de C du sol au seul taux d'argile. Selon cet auteur, le niveau critique de C dans les agro-écosystèmes soudano-sahéliens d'Afrique est atteint lorsque le taux de C dans les 20 premiers centimètres du sol ne représente que moins de 3,7% du taux d'argile+limon.

Facteurs responsables de la baisse ou de l'augmentation du stock de C du sol

En zone tropicale ouest-africaine, les études ont unanimement rapporté la baisse du stock de C des sols cultivés (Feller et Milleville, 1977a, b ; Swift et Woomer, 1993 ; Staben *et al.*, 1997 ; Deen et Kataki, 2003). La baisse du stock de C dans cette zone d'Afrique est contrastée à la baisse observée en zone tempérée. En zone tempérée, la baisse du stock de C des sols cultivés est lente, progressive et atteint l'équilibre après une période de culture de l'ordre du siècle (Jenkinson and Rayner, 1977 ; Parton *et al.*, 1987 ; Coleman *et al.*, 2005). Dans les agro-écosystèmes d'Afrique de l'Ouest en revanche, le stock de C des sols cultivés baisse fortement au cours des premières années qui suivent la défriche et l'équilibre n'est atteint qu'après une vingtaine d'années environ (Zingore *et al.*, 2005 ; Bostick *et al.*, 2007 ; Gottschalk *et al.*, 2010 ; Kintché *et al.*, 2010).

La baisse du stock de C des sols cultivés dépend des pratiques culturales et aussi des conditions pédoclimatiques. Les températures élevées en zone tropicale, qui augmentent la minéralisation de C du sol, sont l'un des principaux éléments mis en avant pour expliquer la forte baisse du stock de C dans cette zone (Siband, 1974 ; Solomon, 2007). Lineres *et al.* (1993), Zech *et al.* (1997) et Norman *et al.* (2003) ont lié cette baisse à des restitutions assez faibles et à la qualité moins bonne (rapport C/N élevé) de C retournant au sol à travers la biomasse des cultures. Des études plus récentes comme ceux de Mando *et al.* (2005), Al-Kaisi *et al.* (2005), Franzluebbers *et al.* (1995) et de Six *et al.* (2002b) ont également lié la baisse du stock de C des sols aux changements pédoclimatiques induits par la défriche et le labour continu du sol. En effet, le labour induit des phases d'humectation et de dessèchement très contrastées suite à l'augmentation de l'aération du sol puis déprotège le C en détruisant les agrégats du sol (Balesdent *et al.*, 2000). L'érosion est un autre principal facteur responsable de la baisse du stock de C des sols cultivés en Afrique (Roose *et al.*, 2001).

La fertilisation minérale peut accélérer ou atténuer la baisse du stock de C du sol (de Ridder *et al.*, 2004 ; Bationo *et al.* 2006). En effet, lorsque la fertilisation minérale induit une augmentation de biomasses (racines) moins élevée que la perte de C organique du sol qu'elle suscite (à travers son effet positif sur les microorganismes), des baisses de stock peuvent être observées et inversement. Dans les systèmes à base de cotonniers d'Afrique de l'Ouest où les tiges de cotonniers sont arrachées puis brûlées à cause des risques phytosanitaires, l'effet de la fertilisation minérale se traduirait donc par une baisse rapide du stock de C du sol. Les apports de fumier, la jachère de longue durée et récemment le semis direct sous couverture végétale ont été rapportés comme des techniques améliorant le stock C du sol (Nye et Greenland,

1960 ; Fauck *et al.*, 1969 ; Morel et Quantin, 1972 ; Oliver *et al.*, 2000, Badiane *et al.*, 2001). Leurs effets dépendent toutefois du taux d'argile du sol et également de la phase où la technique est pratiquée. A travers la formation du complexe argilo-humique, l'argile préserve la minéralisation de C du sol et facilite son accumulation dans le sol (Jenkinson and Rayer, 1977 ; Schloesing, 1874 ; Janssen, 1984 ; Bohn *et al.*, 1985 ; Campbell *et al.*, 1999). Les apports de fumier ou la pratique de jachère durant la phase de baisse rapide du stock de C (premières années après la défriche) augmentent difficilement le stock de C du sol.

Conclusion partielle

Les paragraphes qui précèdent, montrent que les causes de la baisse du stock de C des sols cultivés sont largement documentées et que son maintien en zone tropicale au niveau initial paraît : (i) irréaliste, puisque le seul fait de défricher et les températures élevées constituent une profonde cause de cette baisse et (ii) sans intérêt agronomique majeur ; les rendements de cultures pouvant rester stables au cours des premières années qui suivent la défriche, cependant que le stock de C baisse. Toutefois, les niveaux du stock de C en-dessous desquels la productivité des systèmes n'est plus assurée sont difficilement généralisables. Pour chaque type de sol et chaque type de culture, le suivi de l'évolution des rendements de récolte serait nécessaire afin de préciser les niveaux du stock de C en-dessous desquels la réponse des cultures à la fertilisation minérale n'est plus assurée.

1.2.2. Eléments minéraux

Rôle

Environ treize éléments minéraux entrent dans l'alimentation des plantes cultivées. Trois d'entre eux, à savoir l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), sont consommés en quantités élevées et déterminent le niveau des rendements. N commande l'assimilation chlorophyllienne et est le principal facteur qui augmente quantitativement la production agricole (Mosier *et al.*, 2004). P assure le transport d'énergie dans les phénomènes de photosynthèse et de métabolismes divers. Il favorise en particulier le développement racinaire et la nodulation chez les légumineuses et se révèle le facteur de précocité des végétaux (Nyle *et al.*, 2008). K est d'une part un facteur de vigueur et de résistance aux maladies ou à la sécheresse et d'autre part le facteur régulateur des fonctions chlorophylliennes de la plante. K est donc l'élément d'équilibre, de santé et de développement qualitatif de la plante (Scherer *et al.*, 2003). Les minéraux tels que le magnésium (Mg) et le calcium (Ca) sont consommés en quantités faibles, mais leur carence peut entraver la production en raison de leurs effets qui sont positifs sur les propriétés acido-

basiques du sol et de leur interaction positive avec les minéraux majeurs, K notamment (Duchaufour, 1979 ; Van Keulen et *al.*, 1982 ; Fageria et *al.*, 2004 ; Milha et *al.*, 2004).

Facteurs responsables de la baisse et de l'augmentation du stock minéral du sol

Les phénomènes responsables de la diminution des stocks minéraux du sol sont : (i) les exportations à travers la récolte, (ii) les pertes induites par l'érosion, le lessivage, la lixiviation et (iii) pour N en particulier, la dénitrification, la volatilisation et la réorganisation microbienne (Roose, 1981 ; Stoorvogel et *al.*, 1990). Les pertes minérales liées aux exportations par les cultures dépendent du niveau des rendements et du mode de gestion des résidus de récolte. Le brûlis des résidus de récolte, qui est pratiqué en culture cotonnière en Afrique de l'Ouest, induit la perte totale de N par volatilisation et accroît les risques de pertes par lessivage des autres minéraux. Le prélèvement des résidus de récolte à des fins domestiques est une autre source de pertes minérales, notamment de K qui est le minéral le plus concentré⁵ dans la paille des céréales. Les pertes liées à l'érosion, au ruissellement et à la lixiviation dépendent : (i) de l'élément considéré (moins importantes pour P ; Janssen et *al.*, 1990), (ii) de la texture et la structure du sol (pente, porosité et CEC), (iii) de la pluviométrie, (iv) du degré de maîtrise du phénomène à travers les pratiques culturales (labour et paillage) et (v) de l'importance du couvert végétal et du système racinaire de la plante⁶ (Roose et *al.*, 2001). Ces pertes sont variables et leurs estimations sont peu précises ; les erreurs pouvant représenter 50 à 200% de la valeur nominale du flux considéré (Oenema et *al.*, 1999 ; de Ridder et *al.*, 2004). En zone soudano-sahélienne, les pertes N, P et K dues à l'érosion et au ruissellement, ont été rapportées aux valeurs moyennes respectives de 47, 16 et 32 kg ha⁻¹ an⁻¹ (Roose, 1981). Les pertes N par dénitrification sont élevées en conditions de forte acidité et de dessèchement du sol. Celles liées à la réorganisation microbienne sont élevées lorsque le rapport C/N du sol est élevé (incorporation au sol de la paille de céréales, du fumier ou du compost mal décomposés).

Les entrées minérales au sol résultent (i) de la fertilisation minérale et organique, (ii) des apports par la pluie et le vent et (iii) la fixation atmosphérique de N par les légumineuses. Les apports minéraux par la pluie et le vent sont également très variables et leur estimation est peu précise

⁵K est le minéral le plus important dans les résidus de récolte. En moyenne 1,72 ; 1,44 et 1,65% dans la matière sèche des tiges du cotonnier, du maïs et du fumier respectivement.

⁶ Les pertes N et K par lessivage sont négligeables sous le mil et le sorgho, relativement faibles sous le maïs et le cotonnier mais élevées sous l'arachide.

(Andrist-Rangel et *al.*, 2007). En Afrique au Sud du Sahara, Pieri (1984) a rapporté des apports N, P et K par la pluie équivalents en moyenne à 6, 3 et 5 kg ha⁻¹ an⁻¹.

Bilan minéral

Le bilan minéral est la différence entre les entrées minérales au sol et les sorties. Il permet d'évaluer les quantités de minéraux à apporter au sol pour compenser les déficits (Van der Pol, 1992). Un bilan minéral succinct (bilan apparent), qui limite les entrées à la fertilisation et les sorties aux exportations par les cultures est le plus souvent utilisé. Il serait en bonne corrélation avec la variation du stock minéral du sol que si les flux liés aux autres phénomènes (pertes par érosion, lixiviation et apports par la pluie et le vent) sont négligeables ou se compensent. Au Burkina Faso, Sedogo (1993) a calculé des bilans apparents N fortement positifs, alors que le stock de N du sol avait fortement baissé à cause des pertes par volatilisation, ruissellement et érosion qui sont loin d'être négligeables dans ces types de sol (Chabalier, 1976 ; Ouattara et *al.*, 1991). S'agissant de P et des bases échangeables dont seulement une fraction est directement disponible pour l'alimentation des cultures (fraction échangeable ou assimilable) et pour lesquels des échanges avec les fractions non directement disponibles peuvent être importants, le bilan minéral peut s'avérer peu informatif (Andrist-Rangel et *al.*, 2006). Par exemple, le bilan minéral peut être positif cependant que la fraction minérale directement disponible aux cultures est déficitaire en raison de transfert dans la fraction non-disponible et inversement. Pour K, Witter et *al.* (2001), Öborn (2004) et Singh et *al.* (1997) ont observé que 25 à 55% des quantités directement disponibles peuvent être transférées dans la fraction non-échangeable et vis versa.

Potentialité du sol à fournir de minéraux aux cultures et modèle QUEFTS

L'alimentation minérale des cultures dépend du niveau des stocks minéraux du sol et également de la facilité avec laquelle le sol libère chaque élément minéral. Les minéraux peuvent être en stocks élevés dans le sol sans être forcément disponibles aux cultures. Les paramètres du sol qui influent cette disponibilité minérale sont essentiellement le stock de C et le pH (Janssen et *al.*, 1990). L'incidence de ces paramètres sur la potentialité du sol à fournir de nutriments a été conceptualisée en modèle QUEFTS (Janssen et *al.*, 1990) et permet de calculer à partir des équations empiriques les quantités de N, P et K que le sol fournit aux plantes cultivées (Smaling et *al.*, 1993 ; Witt et *al.*, 1999 ; Pathak et *al.*, 2003 ; Tittonell et *al.*, 2008). L'approche stipule que la quantité de N (SN) que le sol fournit aux cultures augmente d'une part avec le pH, à cause des pertes N par dénitrification qui sont réduites en sols à pH élevé et d'autre part avec le

stock de C, puisque la minéralisation de la MO est une source de N aux cultures. La fourniture de N est en général optimale lorsque le rapport C/N de la MOS est entre 8 et 12 (Philippe, 1996). La quantité de P que le sol fournit aux cultures (SP) augmente également avec le stock de C, pour les mêmes raisons de libération suite à la minéralisation de la MO (P-organique). Les quantités de P organique du sol peuvent représenter 47 à 56% de P total en sols riches en MO (Tekalign et *al.*, 1988 ; Weil et *al.*, 1988). D'autre part, la potentialité du sol à libérer P est améliorée lorsque son pH varie entre 4,5 et 6,7 (Smaling et *al.*, 1993 ; Nyle et *al.*, 2008). En effet, lorsque le pH du sol est inférieur à 4,5 ou lorsqu'il est supérieur à 6,7, l'essentiel de P est inorganique⁷ et est associé à l'aluminium et au calcium du sol (Fig. 1).

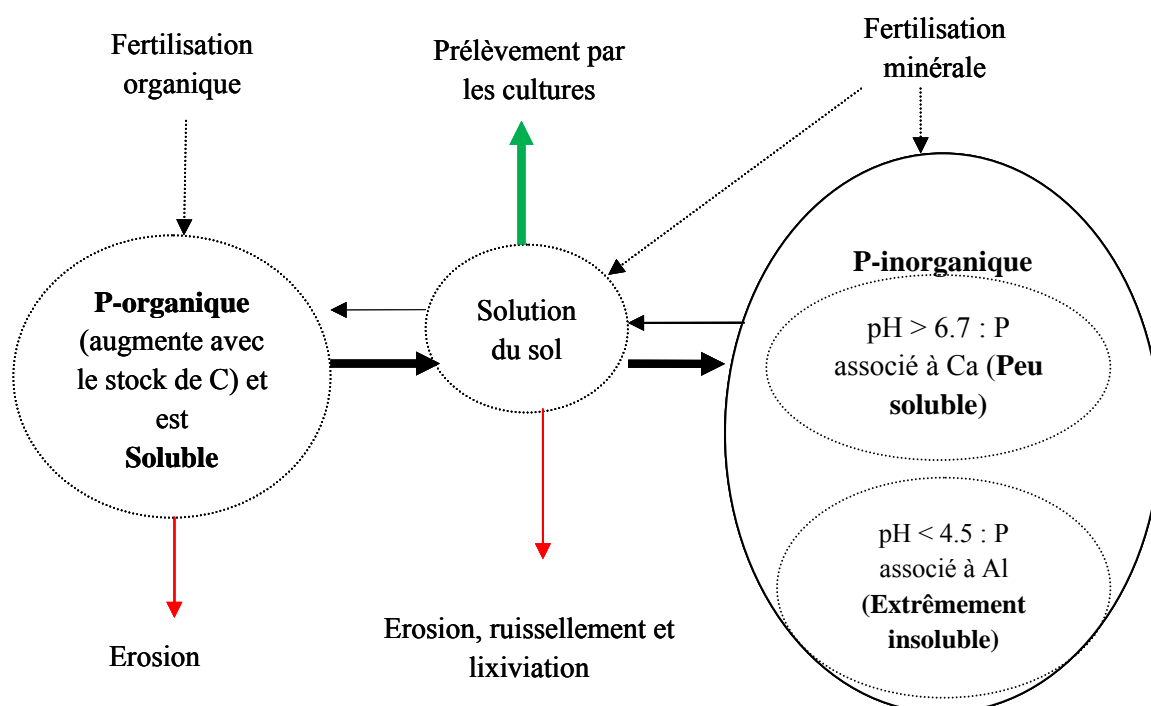


Figure 1 : effet du stock de C et/ou du pH sur les différentes formes de P du sol. L'épaisseur de la flèche entre la solution du sol et les compartiments de P (organique et inorganique) traduit l'importance du flux.

Associé à Ca comme à Al, P est peu soluble dans la solution du sol pour être prélevé par les cultures (Nyle et *al.*, 2008). La potentialité d'un sol à fournir K aux cultures est évaluée à partir de K échangeable (complexe argilo-humique) et de K immédiatement disponible dans la solution du sol. Ces deux compartiments de K du sol sont inversement influencés par l'évolution du stock de C et du pH (Fig. 2).

⁷ Issu de la fertilisation minérale

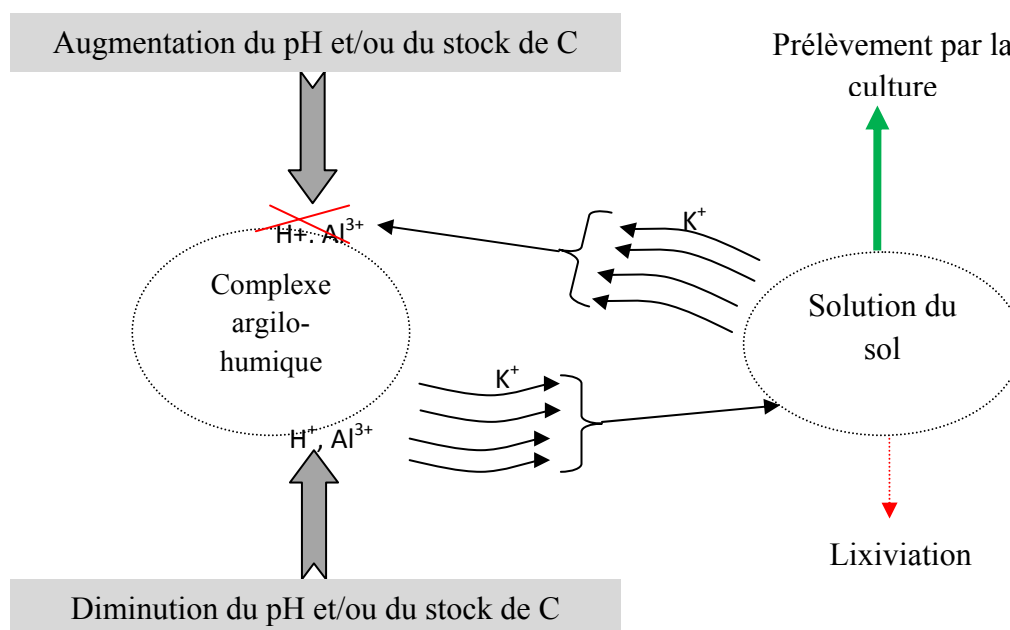


Figure 2 : schéma illustrant l'effet de la variation du stock de C et/ou du pH du sol sur les mouvements de K. (\Rightarrow traduit l'effet du phénomène et \rightarrow le mouvement de K qui en résulte).

Lorsque le stock de C et/ou le pH augmentent, K est mieux fixé sur le complexe argilo-humique en raison d'une part de l'absence des ions Al^{3+} et H^+ sur le complexe et d'autre part de la CEC qui augmente (Becquer et *al.*, 2001). En revanche, la baisse du stock de C ou l'acidification du sol se traduit par l'apparition des ions Al^{3+} et H^+ qui, par substitution à K^+ sur le complexe argilo-humique, augmentent la concentration de K dans la solution du sol. Cette richesse temporaire de la solution du sol en K traduit l'augmentation des quantités immédiatement disponibles aux cultures (Scherer et *al.*, 2003) mais également des risques de pertes par lixiviation. Au regard de ces relations, il est admis dans le modèle QUEFTS que SK augmente avec K-échangeable mais diminue lorsque le stock de C et/ou le pH augmentent, en raison de leurs effets négatifs sur la concentration K dans la solution du sol.

En somme, en dehors des stocks minéraux qui doivent être élevés, une bonne alimentation minérale des cultures exige des niveaux optimaux de certains paramètres du sol dont le pH. Des valeurs trop faibles

du pH entraveraient la nutrition azotée et phosphatée tandis que des valeurs trop élevées entraveraient la nutrition potassique et phosphatée. Les cultures tolèrent à des degrés différents les propriétés acido-basiques du sol. Le maïs tolère des pH allant de 6 à 8, le cotonnier de 6,5 à 7,5 tandis que le sorgho peut tolérer des valeurs aussi faibles qu'élevées (5,4 à 7,8)

1.2.3. Structure et texture du sol

Le mode d'assemblage des différents constituants du sol à un moment donné (structure) et leurs proportions (texture) déterminent aussi la fertilité du sol. En général, les sols argileux sont plus fertiles que ceux sableux. En effet, comme la MOS, l'argile (i) retient l'eau et améliore le niveau de drainage du sol, (ii) assure la stabilité structurale et (iii) contribue à la formation de la CEC (Feller et *al.*, 1996 ; Feller et *al.*, 1997b, Six et *al.*, 2002a). La part de l'argile dans la formation de la CEC et sa capacité à retenir l'eau, dépendent de sa nature. Les sols ferrugineux et ferralitiques d'Afrique de l'Ouest sont dominés par la kaolinite qui est peu gonflante avec des CEC plus faibles (2 à 15 $\text{Cmol}^+ \text{kg}^{-1}$), comparativement à celles de la montmorillonite (80 à 150 $\text{Cmol}^+ \text{kg}^{-1}$) et de la vermiculite (10 à 200 $\text{Cmol}^+ \text{kg}^{-1}$). Ainsi, la CEC de ces sols tropicaux est à près de 80% d'origine organique (Guibert et *al.*, 1999). Wiseman et *al.* (2005) et Mikutta et *al.* (2006) ont également observé que l'argile contribue moins que les oxydes de fer à la formation de la CEC dans les particules fines du sol.

La baisse du taux d'argile du sol est essentiellement due à l'érosion. Le compactage du sol en cas de motorisation excessive, est le plus souvent la dégradation de la structure du sol imputable aux pratiques culturales (Richard et *al.*, 2001). Dans le cas des terres de barre⁸, il a été rapporté que la motorisation (i) pulvérise et induit la prise en masse des particules du sol, (ii) augmente de 10 à 20% la densité apparente, traduisant ainsi la baisse de la porosité et (iii) réduit la stabilité du sol, en raison de l'augmentation du taux d'argiles dispersées (Balbino et *al.*, 2002 ; Freitas et *al.*, 1998 ; Neufeldt et *al.*, 1999).

II. Caractérisation et modélisation de l'évolution du stock de C du sol

2.1. Structure de la matière organique du sol

A l'aide des techniques de chimie organique (chromatographie, pyrolyse et résonnance magnétique), Skjemstad et *al.* (1997) et Stevenson et *al.* (1999) ont rapporté la complexité de la structure microscopique de la MOS. La nature et la synthèse des molécules constitutives de la MOS ont fait l'objet de controverse scientifique (Manlay et *al.*, 2007). En revanche, les études ont unanimement rapporté que la MOS est un mélange de fractions aux différents taux de décomposition. Ainsi, les caractérisations chimiques et physiques de la MOS ont pour objet de séparer puis analyser les différentes fractions. D'autre part, la structure en fractions

⁸ Les terres de barre sont rependues au Sud des pays d'Afrique de l'Ouest tels que le Togo, le Bénin et le Ghana.

de la MOS a été diversement interprétée dans la construction des modèles de simulation de l'évolution du stock de C des sols.

2.2. Fractionnements de la matière organique

2.2.1. Fractionnement chimique

Les fractionnements chimiques ont été utilisés pour (i) étudier la genèse des sols (Duchaufour et Jacquin, 1966), (ii) déterminer les indicateurs de leur fertilité (Feller et *al.*, 1983 ; Waneukem et Ganry, 1992 ; Ruiz et *al.*, 1995) et (iii) analyser leur sensibilité à la dégradation (Thomann, 1964 ; Feller, 1997b). Trois méthodes que sont : (1) l'hydrolyse acide (Stout et *al.*, 1981 ; Trumbore and Zheng, 1996), (2) l'oxydation alcaline (Anderson, 1963) et (3) l'extraction à l'eau chaude (Silveira et *al.*, 2008 ; He et *al.*, 2009) sont fréquemment utilisées.

Hydrolyse acide

Les protocoles d'hydrolyse de C du sol diffèrent par la nature de l'acide utilisé, sa molarité, le rapport sol/acide, le temps et la température d'hydrolyse (Barriuso et *al.*, 1987 ; Xu et *al.*, 1997 ; Paul et *al.*, 2001 ; Chefetz et *al.*, 2002). Schnitzer et *al.* (1983) et Rovira et *al.* (2000) ont comparé la méthode à l'acide chlorhydrique (HCl) à celle de l'acide sulfurique (H₂SO₄) et ont noté que la méthode à l'HCl est plus efficace en raison des résultats qui sont moins affectés par la matrice minérale du sol. Silveira et *al.* (2008) ont rapporté que l'HCl de molarité de 6M, utilisé dans un rapport sol/acide de 1/50 et chauffé à 105°C, permet d'hydrolyser le maximum de C du sol après 18 heures d'attaque. La fraction de C du sol résistante à l'hydrolyse HCl peut varier entre 23 et 70% de C total et est, environ, 1500 ans plus âgée que le C total (Leavitt et *al.*, 1997 ; Paul et *al.*, 2006). Ce résultat indique que l'HCl hydrolyse préférentiellement le C jeune du sol. Falloon et *al.* (1998) et Paul et *al.* (2006) ont également montré que la quantité de C du sol résistant à l'hydrolyse HCl est une fonction croissante du taux de C dans les particules fines du sol. Collins et *al.* (2000) ont rapporté que l'hydrolyse acide n'extrait pas la lignine contenue dans la MO et que la structure de la molécule est détruite par cette méthode de fractionnement chimique.

Oxydation alcaline

L'oxydation de C du sol peut être réalisée au moyen de l'hypochlorite de sodium (NaOCl) (Kaisier et *al.*, 2002 ; Siregar et *al.*, 2005) ou du pyrophosphate de sodium (Na₄P₂O₇) (Buurman, 1996 ; Paul et *al.*, 2008c). Les fractions de C résistant à l'oxydation NaOCl et Na₄P₂O₇ peuvent varier entre 6 et 37% et entre 52 à 80% de C total du sol respectivement

(Mc Dowell et *al.*, 2001 ; Mikutta et *al.*, 2005 ; Helfrich et *al.*, 2007 ; Paul et *al.*, 2008c). Le C du sol résistant à l'oxydation au NaOCl est en général plus âgée que celui résistant à l'hydrolyse acide, indiquant que NaOCl extrait plus le C ancien (Kaiser et *al.*, 2002 ; Kleber et *al.*, 2005). Contrairement à l'hydrolyse acide, les résultats d'oxydation de C sont dépendants de la composition minéralogique du sol et la structure de la molécule de la MO est préservée (Paul et *al.*, 2008c). D'autre part, la quantité de C résistant à l'oxydation ne dépend pas de la quantité de C dans les particules fines du sol (Zimmerman et *al.*, 2007). Comme la lignine dans le cas de l'hydrolyse acide, les groupements aliphatiques de la MOS ne sont pas facilement oxydés (Mikutta et *al.*, 2005). Les résultats obtenus tant avec l'hydrolyse acide qu'avec l'oxydation semblent être dépendants des pratiques culturales (Plante et *al.*, 2004 et 2006 ; Helfrich et *al.*, 2007).

En somme,

1- Les résultats du fractionnement chimique peuvent être différents selon la méthode et la nature du réactif utilisé. L'oxydation au NaOCl extrait plus de C et particulièrement C ancien que l'hydrolyse HCl, qui elle aussi en extrait plus que l'oxydation au $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$. Cependant, l'analogie entre la quantité de C extraite par chacune de ces méthodes artificielles et la quantité de C que les microorganismes peuvent dégrader dans les conditions ambiantes du sol est à notre connaissance peu documentée.

2- Chacune des méthodes a ses avantages et inconvénients. L'hydrolyse acide n'extrayant pas de la lignine et l'oxydation alcaline non plus les groupements aliphatiques, les deux méthodes peuvent donner des quantités de C résistant qui ne sont pas forcément stables ; puisque ces éléments non-extraits sont susceptibles d'être dégradés par les microorganismes du sol (Van Bergen et *al.*, 1997). Les résultats d'oxydation ne sont pas fonction de la quantité de C dans les particules fines du sol et suppose inacceptablement que la résistance de C du sol ne dépend pas du taux d'argile. Les résultats d'oxydation dépendent de la composition minéralogique du sol, excluant ainsi toute généralisation et reproductibilité des résultats. Enfin, la dépendance des résultats aux pratiques culturales questionne la stabilité de C résistant évalué avec chacune des deux méthodes. Toutefois, la particularité de l'hydrolyse acide à extraire moins le C ancien (supposé être stable), traduit vraisemblablement la stabilité de C résistant à cette méthode.

2.2.2. Fractionnements physiques

La densimétrie (Monnier *et al.*, 1962) et la granulométrie (Edwards *et al.*, 1964 ; Bruckert, 1979) sont les méthodes de fractionnements physiques de la MOS fréquemment utilisées. Le fractionnement densimétrique consiste à séparer la MOS selon la densité des constituants du sol. Un mélange de benzène et de bromoforme est utilisé pour scinder l'échantillon de sol en une fraction dite "libre" (densité < 1,75) et en une autre dite "liée" ($d > 1,75$). La fraction "liée" est plus dense et moins riche en MOS. La fraction "libre" peut être à nouveau séparée en couplant la densimétrie avec le fractionnement au moyen de l'ultrason. L'inconvénient de la méthode réside dans l'utilisation des liqueurs organiques denses (benzène et bromoforme) qui contamineraient et dénatureraient la MOS (Hien, 2004).

Le fractionnement granulométrique consiste à séparer la MOS dans des constituants de sol de différentes tailles. Les ultrasons (Edwards et Bremmer, 1964), les billes d'agate (Bruckert, 1979) ou la résine sous forme sodique (Feller *et al.*, 1991b ; Gravinelli *et al.*, 1995a) sont utilisés pour disperser la suspension de sol. Contrairement au fractionnement densimétrique, le fractionnement granulométrique préserve la MOS contre la destruction et évite toute contamination (Balesdent *et al.*, 1991 ; Amelung *et al.*, 1998 ; Amelung and Zech, 1999).

2.2.3. Apport du traçage naturel de C à l'analyse du stock de C du sol

Les isotopes stables de C (^{13}C et ^{12}C) ont été récemment utilisés pour préciser l'origine et déterminer la cinétique de MO d'origines différentes (Balesdent *et al.*, 1987 ; Girardin *et al.*, 1991 ; Liang *et al.*, 1999). Le principe des isotopes de C repose sur la différence naturelle dans le rapport ($R = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) entre les plantes à photosynthèse C_3 (ligneux et une minorité de graminées tropicales) et celles à photosynthèse C_4 (majorité des graminées). Les plantes à photosynthèse C_3 sont riches en isotope ^{12}C (R faible) tandis que celles à photosynthèse C_4 sont riches en isotope ^{13}C (R élevé). La composition isotopique ($\delta^{13}\text{C}$), qui est la différence relative de R de l'échantillon et de R de la référence isotopique, est ainsi plus faible pour les plantes à photosynthèse C_3 ($\approx -28\text{‰}$) que pour celles à photosynthèse C_4 ($\approx -12\text{‰}$). Troughton *et al.* (1974), Stout *et al.* (1981) et Martin *et al.* (1990) ont montré que la composition isotopique de la MOS est très proche de celle de la végétation en équilibre sur la parcelle ; avec toutefois un léger enrichissement isotopique avec la profondeur. Dans cette logique, le traçage naturel de C permet de préciser l'origine (plante à C_3 ou C_4) d'une MO dont le signal isotopique est connu. L'une des importantes applications du traçage isotopique de C en agriculture a été l'étude du renouvellement de C du sol après le passage d'une végétation

typiquement C₃ (forêt) à une autre typiquement C₄ (monoculture de maïs par exemple) ou vis versa (Cerri et *al.*, 1985 ; Vitorello et *al.*, 1989 ; Skjemstad et *al.*, 1990 ; Balesdent et *al.*, 1991 ; Martin et *al.*, 1992 ; Paul et *al.*, 2008a). Dans de tels cas de changement de végétations, la mesure du signal isotopique de C du sol entre deux dates allant de l'année au siècle, permet de déterminer la cinétique⁹ de C provenant de la végétation primaire et de celle de remplacement (Balesdent and Mariotti, 1996).

De telles études seraient d'une utilité majeure dans la gestion du stock organique des sols cultivés en zone tropicale ouest-africaine où la baisse du stock de C est un problème réel. Malheureusement, la rareté (voire l'inexistence) de dispositifs expérimentaux caractérisés de changement définitif de végétations constitue un problème. Les agro-écosystèmes d'Afrique de l'Ouest sont caractérisés d'alternance de plantes C₃ (cotonnier) et C₄ (céréales) dans les systèmes cultivés ou la cohabitation des deux types de plantes dans les systèmes naturels (Schwartz, 1991). Un dispositif où la végétation primaire a été remplacée par une végétation C₄ (monoculture de sorgho) a été rapporté au Burkina Faso (Sédogo, 1993 ; Hien, 2004) mais ne disposerait pas de données isotopiques initiales.

Une autre application du traçage naturel de C en agriculture repose sur la détermination des compartiments de C du sol (Mariotti, 1991). L'existence d'une relation linéaire entre le signal isotopique de C et l'inverse de la concentration de C dans le sol, supposerait deux fractions de C dont l'une se minéralise plus vite que l'autre. En revanche, lorsque le signal isotopique de C est linéairement corrélé au logarithme de sa concentration, un stock de C en phase d'humification est soupçonné.

2.3. Modèles d'évolution du stock de C du sol

A partir de 1940, la recherche sur la fertilité des sols a été marquée par la construction de modèles permettant de simuler la dynamique du stock de C des sols (Hénin-Dupuis,

⁹ La fraction (α) de C provenant de la végétation de remplacement est donnée par la relation : $\alpha = \frac{\delta_f - \delta_i}{\delta_r - \delta_i}$

où δ_r est le signal isotopique de C de la végétation de remplacement ; δ_i et δ_f , le signal isotopique de C du sol à l'état initial et final, respectivement.

1945 ; Jenkinson and Rayner, 1977 ; Parton *et al.*, 1987). Ces modèles diffèrent par deux éléments principaux qui marquent leur complexité relative. Ce sont :

1- Le nombre de compartiments du stock de C. A l'exception du modèle Hénin-Dupuis (HD) qui considère le stock de C du sol est en un compartiment, les autres modèles considèrent 2 à 5 compartiments. Un des compartiments est supposé stable et les autres labiles avec différents taux de décomposition. Les modèles à plus de deux compartiments diffèrent également par la taille du compartiment de C stable. Par exemple, le modèle à 2 compartiments de C, proposé par Andriulo *et al.* (1999) (AMG), suppose que le compartiment stable peut représenter jusqu'à deux tiers du stock initial de C. Tandis que celui à 5 compartiments, proposé à Rothamsted UK (Roth C ; Jenkinson and Rayner, 1977), suppose que le compartiment inerte de C est de l'ordre de 7% du stock initial.

2- Le degré d'intégration des paramètres environnementaux dans la simulation de l'évolution du stock de C. Certains modèles, comme ceux de Rothamsted (RothC) et Century, simulent le stock de C en intégrant explicitement les données climatiques (température et pluviométrie) à travers des ratios empiriques (Jenkinson *et al.*, 1987 ; Parton *et al.*, 1987). Ces modèles sont un peu plus complexes et leur calibrage nécessite assez de données. En revanche, les modèles comme ceux de HD et AMG sont calibrés sans intégrer les données climatiques (Andriulo *et al.*, 1999). Ils sont peu exigeants en données et relativement simples.

Toutefois, le degré de complexité ou d'exigence en données d'un modèle n'est aucunement pas un critère valide de choix ; puisque certains modèles peuvent se révéler plus performants que d'autres dans la description du stock de C du sol (Smith *et al.*, 1997 ; Andriulo *et al.*, 1999). La performance des modèles mérite d'être particulièrement questionnée en zone tropicale (Van Keulen, 2001). En effet, les modèles existants ont été, en général, construits puis calibrés à partir de données observées en conditions tempérées où les conditions diffèrent fortement de celles de la zone tropicale. Un autre critère à considérer dans le choix du modèle est le risque d'erreur relative à la sensibilité du modèle vis-à-vis de ses paramètres, dont certains sont difficiles à déterminer (Janik *et al.*, 2002).

Afin de calibrer les modèles multi-compartimentaux, la fraction stable de C a été diversement déterminée dans la littérature : (i) par fractionnement granulométrique (Feller *et al.*, 1981), (ii) par traçage naturel de C (Andriulo *et al.*, 1999 ; Diels *et al.*, 2004), (iii) par hydrolyse acide (Rovira *et al.*, 2007 ; Zimmermann *et al.*, 2007) et (iv) comme étant une proportion du stock initial de C ou par datation (Coleman *et al.*, 2005). Enfin les modèles tels que RothC et Century disposent des interfaces de calibrage (RothC 26.3 et Century version 4.0) conçus à

partir de données observées en conditions tempérées. Certains des paramètres, dont les taux de décomposition des compartiments labiles de C, ne sont pas modifiables dans RothC 26.3 ; questionnant ainsi son application généralisée, en particulier en zone tropicale.

Chapitre 2

Cadre général et méthodologie de l'étude

Introduction

L'étude a été conduite au Togo. Près de 69% des 56 600 Km² de la superficie togolaise sont des terres à vocations agricoles et 38% de celles-ci sont réellement exploitées (FAO, 2006). L'agriculture togolaise est pluviale et emploie près de 75% de la population active comme de petits agriculteurs appliquant des méthodes traditionnelles d'exploitation. Les deux cultures principales sont le maïs au sud et au centre du pays et le sorgho/mil au nord. L'agriculture fait vivre 70% de la population nationale (5,75 millions d'habitants en 2010) et contribue pour près de 40% à la formation du Produit Intérieur Brut (PIB) national. Le Togo est divisé en cinq régions dont, du Sud au Nord, la région Maritime, des Plateaux, Centrale, de la Kara et des Savanes. Les conditions pédoclimatiques et la disponibilité des facteurs de production agricole (notamment la terre) varient sensiblement d'une région à une autre.

L'étude a utilisé les données d'expérimentations de longue durée conduites sur des points de recherche en conditions contrôlées, des données de sols sur des parcelles paysannes (conditions non-contrôlées) ainsi que des données d'enquêtes réalisées en milieu paysan. La diversité pédoclimatique du pays a été prise en compte à travers la situation des points de recherche et des villages de collecte de données dans les différentes zones agro-écologiques. La dimension temporelle a été également intégrée à travers la durée (20 à 40 ans) des expérimentations concernées par l'étude. Le présent chapitre décrit les conditions pédoclimatiques du pays, le cadre des activités agricoles et la méthodologie de l'étude.

I. Cadre général de l'étude

1.1. Contexte climatique du Togo

Les données de pluviométrie et de température présentées ici ont été collectées auprès de la Direction Générale de la Météorologie Nationale et correspondent pour chaque région à la moyenne des valeurs enregistrées sur deux sites météorologiques¹⁰.

¹⁰Lomé et Tabligbo pour la région Maritime, Atakpamé et Kouma-Konda pour la région des Plateaux, Sokodé et Sotouboua pour la région Centrale, Kara et Niamtougou pour la région de la Kara, Dapaong et Mango pour la région des Savanes

Le Togo jouit d'un climat tropical variant sensiblement du Sud au Nord. Le climat est de type subéquatorial (chaud et humide) au Sud, de type guinéo-soudanien (pluvieux) dans la zone montagneuse du Centre et de type sub-sahélien (chaud et sec) au Nord. Durant les 30 dernières années (1980 à 2010), la pluviosité interannuelle a été variable avec des niveaux de précipitations plus faibles dans les régions Maritime (en moyenne 912 mm an⁻¹) et des Savanes (1042 mm an⁻¹) et plus élevés dans la région des Plateaux où la moyenne est de 1501 mm an⁻¹ (Fig. 1a et b). Les régions Centrale et de la Kara ont été moyennement arrosées avec des moyennes annuelles de précipitation de 1287 et 1319 mm respectivement.

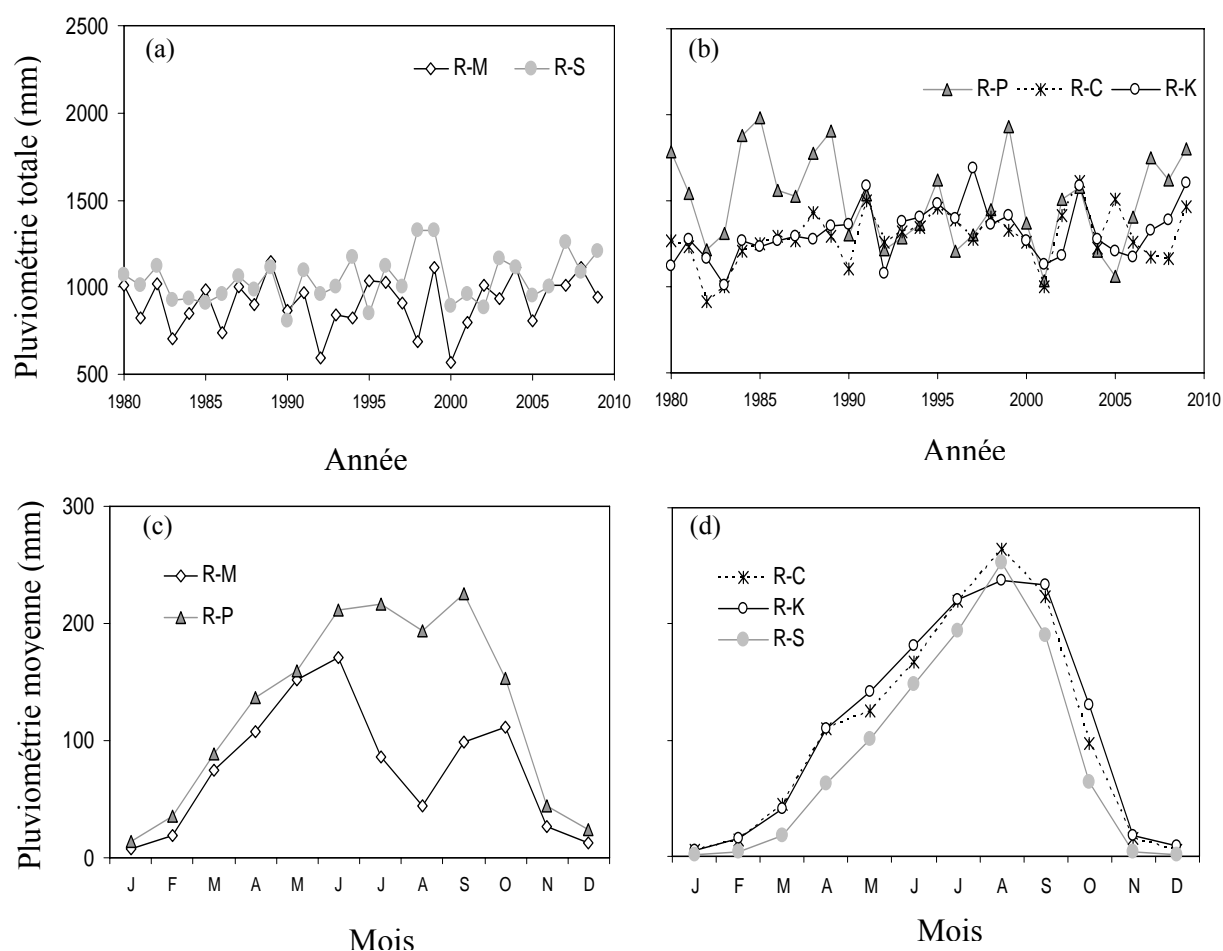


Figure 1 : évolution interannuelle de la pluviométrie (a et b) et répartition mensuelle de la moyenne des trente dernières années (c et d) dans les régions Maritime (R-M), Plateaux (R-P), Centrale (R-C), Kara (R-K) et des Savanes (R-S).

La répartition intra-annuelle de la pluviométrie est aussi spécifique aux régions (Fig.1c et d). Les régions Maritime et des Plateaux connaissent par an deux saisons pluvieuses (mars/avril à juillet et septembre à mi-novembre) et deux saisons sèches (en août et mi-novembre à mars/avril). Les hauteurs moyennes de pluie durant la grande saison pluvieuse sont

comparables dans ces deux régions. Les hauteurs de pluies pendant la petite saison pluvieuse sont en revanche plus faibles dans la région Maritime et la petite saison sèche y est aussi fortement plus marquée (Fig. 1c). Les régions Centrale, de la Kara et des Savanes connaissent une saison pluvieuse de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. Ainsi, les régions méridionales du Togo connaissent deux saisons agricoles tandis que les régions septentrionales n'en connaissent qu'une seule. Ces dernières années, le retard des premières pluies et leur mauvaise répartition pendant la campagne agricole affectent négativement la production agricole. Dans la partie côtière de la région Maritime, ces aléas climatiques rendent très incertaine la petite saison agricole.

Les températures sont aussi variables d'une région à une autre (Fig. 2). Durant les 30 dernières années (1980 à 2010), les moyennes annuelles les plus élevées de température ont été enregistrées dans les régions des Savanes et Maritime (Fig. 2a), avec des valeurs respectives variant entre 27,8 et 29,4 °C et entre 27,1 et 28,3 °C. C'est dans ces mêmes régions que la pluviométrie a été la plus faible (Fig. 1a). La partie ouest de la région des Plateaux (Kouma-Konda) a été la zone la plus fraîche du pays avec des températures moyennes annuelles variant de 23,3 à 24,9 °C (Fig. 2c). Dans la partie Nord-est de ladite région (zone d'Atakpamé), les températures ont varié entre 26,1 et 27,2 °C et sont comparables à celles des régions Centrale (26,1 à 27,1 °C) et de la Kara (26,2 à 28,1 °C). Contrairement à la région des plateaux où les températures sont ainsi contrastées entre la partie ouest et le nord-est (Fig. 2c), elles sont plus ou moins homogènes à l'intérieur des autres régions. La variabilité de température entre les deux sites météorologiques de chacune des régions Maritime, Centrale et de la Kara est comparable à la variabilité représentée par des écarts types dans le cas de la région des Savanes (Fig. 2a). En général, les moyennes mensuelles de température sont maximales entre mars et avril et minimales de juillet à septembre (Fig. 2d). Ces valeurs moyennes (annuelles et mensuelles) cachent cependant des élévations maximales de température. En un moment de la journée, les températures peuvent atteindre 34, 33, 35, 36 et 39 °C dans les régions Maritime, des Plateaux, Centrale, de la Kara et des Savanes respectivement.

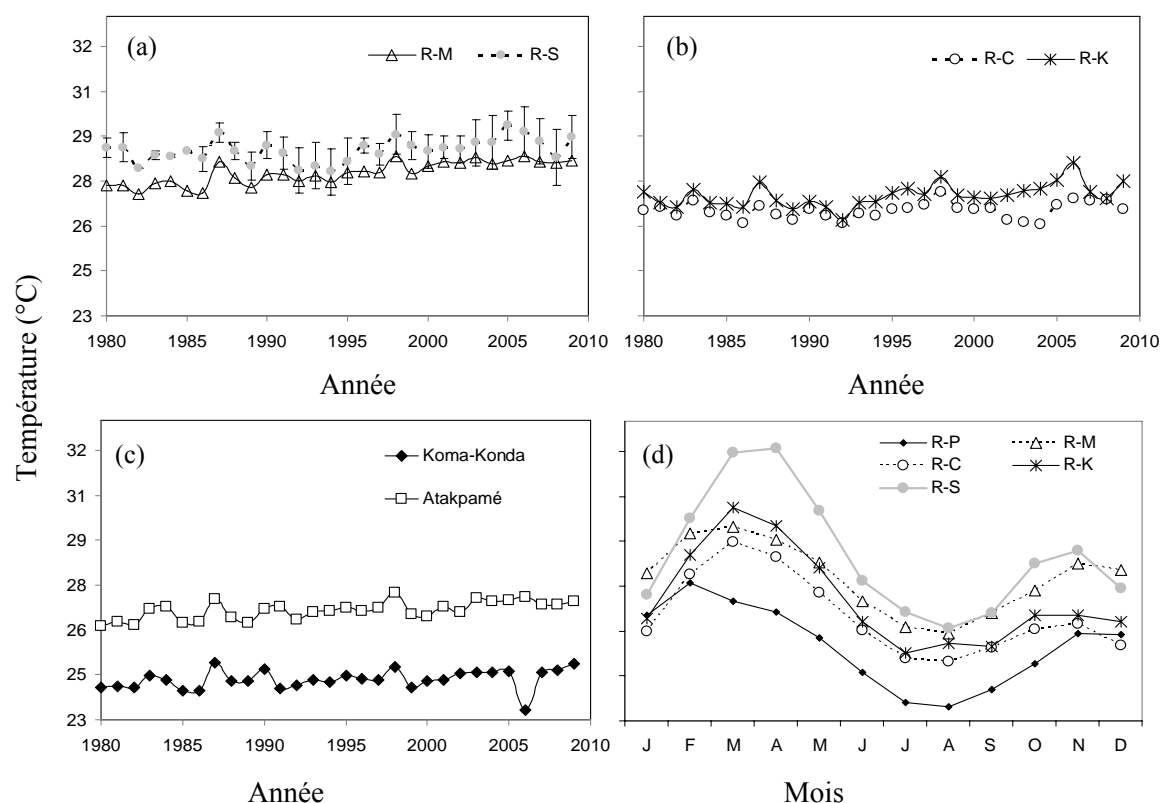


Figure 2 : évolution interannuelle de la température (a = Régions plus chaudes, b = Régions moyennement chaudes et c = Région des plateaux) et répartition mensuelle de la moyenne des trente dernières années (d). R-M = Maritime, R-P = Plateaux, R-C = Centrale, R-K = Kara et R-S = Savanes.

L'évapotranspiration (ETP) est plus élevée dans les régions des Savanes et Maritime (Table 1). D'une part, le niveau élevé de l'ETP dans ces régions s'explique par des températures qui sont aussi élevées (Fig. 2a). D'autre part, il s'explique par le fort rayonnement et la durée d'insolation assez longue pour la région des Savanes et par des vitesses de vent assez élevées pour la région Maritime (Table 1).

Table 1 : Variabilité mensuelle de l'évapotranspiration, d'ensoleillement, de la vitesse du vent et de l'humidité relative moyenne de l'air dans les régions du Togo

Région	ETP (mm mois ⁻¹)	Ensoleillement		Vitesse du vent (km jour ⁻¹)	Humidité relative moyenne de l'air (%)
		Durée moyenne (heure jour ⁻¹)	Rayonnement (MJ m ⁻² jour ⁻¹)		
Maritime	102 - 155	5,1 – 8,0	16,4 – 20,3	104 - 320	82 - 87
Plateaux	90 - 143	4,0 – 8,6	13,8 – 20,9	52 - 112	60 - 89
Centrale	90 - 133	3,1 – 8,8	14,0 – 20,6	26 - 52	54 - 101
Kara	nd	4,3 – 8,2	nd	nd	43 - 99
Savanes	105 - 167	4,4 – 9,2	16,2 – 22,7	35 - 130	26 - 88

Source : Adjoussi, 2000 ; nd = non disponible

En général, l'ETP est plus élevée que la pluviométrie pendant : (i) les 3 premiers et 6 derniers mois de l'année dans la région Maritime, (ii) les 3 premiers et 3 derniers mois de l'année dans la région des Plateaux et (iii) les 5 premiers et 3 derniers mois de l'année dans les régions du Nord. Ce niveau de l'ETP qui est plus élevé que la pluviométrie durant toute la petite saison agricole dans la région Maritime entrave l'alimentation hydrique des cultures. Enfin, le niveau plus élevé de l'ETP que la pluviométrie pendant les 5 premiers mois de l'année dans les régions du Nord impose un démarrage tardif de la campagne agricole.

1. 2. Sol et relief

L'étude éco-géographique du Togo réalisée en 1983 dans le cadre du projet PNUD / FAO / TOG/83/009 découpe le territoire national en six zones agro-écologiques (Fig. 3).

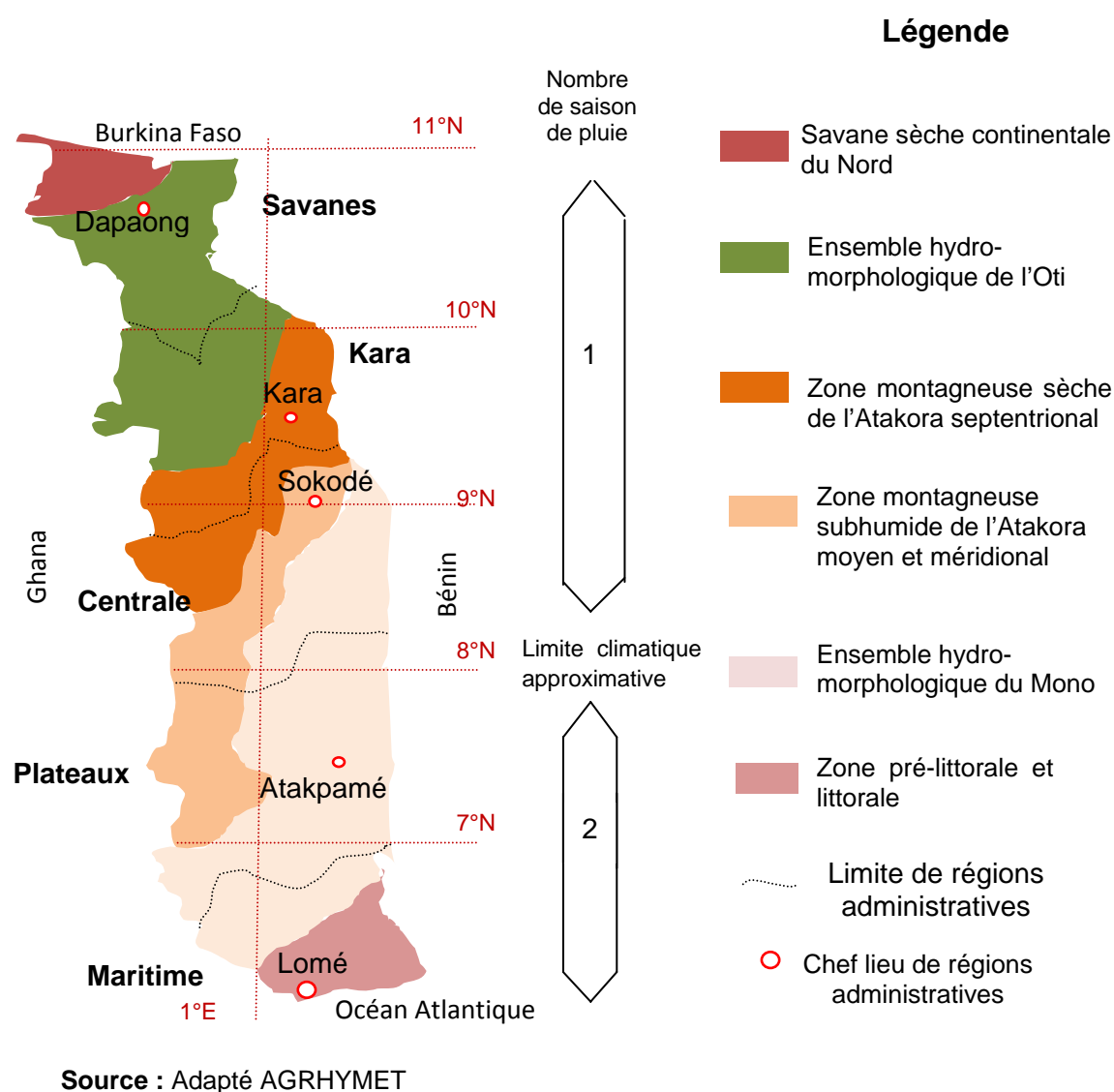


Figure 3 : Carte des zones agro-écologiques, régions administratives et nombre de saisons agricoles

1.2.1. Zone pré-littorale et littorale

Elle correspond à l'extrême Sud de la région Maritime (Fig. 3) et comprend : le plateau de terre de barre et le bassin sédimentaire côtier englobant cordon littoral et système lagunaire.

1.2.1. Ensemble hydro-morphologique du Mono

Cet ensemble comporte les sols ferrugineux qui couvrent la plus grande partie du secteur, les vertisols ou sols à caractères vertiques, les sols ferralitiques et les sols peu évolués d'érosion. Ils sont, dans leur ensemble, propices à la production agricole et sont localisés dans la région des Plateaux et dans la partie Est de la région Centrale.

1.2.3. Zone montagneuse subhumide de l'Atakora moyen et méridional

L'ensemble correspond à la partie ouest des régions Centrale et des Plateaux. Il comprend quatre sous-zones : le piémont de l'Atakora méridional, le plateau sub-atakorien, l'ensemble du plateau de l'Adélé et le massif de l'Atakora moyen. C'est la zone propice à la culture des plantes fruitières, notamment dans la région des Plateaux.

1.2.4. Zone montagneuse sèche de l'Atakora septentrional

Cette zone représente la majeure partie de la région de la Kara et une partie de la région Centrale. Elle se caractérise par un relief très complexe marqué de fortes pentes. Elle se subdivise en trois sous-zones : (i) le plateau de Bassar et la plaine de mô, (ii) le système du massif kabyè (culminant à 800 m) et de la chaîne de Défalé (650 m) et (iii) les collines de Kantè appartenant de l'unité structurale des schistes de l'Atakora. Cette zone comprend quatre classes de sols : les sols ferrugineux tropicaux, les sols ferralitiques, les vertisols et les sols évolués. L'érosion a provoqué une prédominance des éléments grossiers en surface, entravant ainsi l'alimentation hydrique des plantes.

1.2.5. Ensemble hydro-morphologique de l'Oti

Il se situe entre les régions de la Kara et des Savanes et comprend du Nord au Sud deux unités : la plaine de l'Oti (altitude moyenne 100 m) et la zone de collines au Nord de Kantè. Leur valeur agronomique dépend de l'importance de l'hydromorphie et de la profondeur à laquelle se manifestent l'induration et la concrétion.

1.2.6. Savane sèche continentale du Nord

Cette zone se localise dans la partie nord de la région des Savanes et comprend du Nord-ouest au Sud deux unités : la pénéplaine formée de roches cristallines au Nord de Dapaong à une

altitude moyenne de 200 m et la zone de plateaux de Dapaong et de Bombouaka dont les rebords culminent à 500 m. Cette zone comprend trois grands types de sols : les sols ferrugineux tropicaux lessivés sur de grandes profondeurs qui sont majoritaires, les sols peu évolués d'érosion et les sols hydromorphes peu humifiés à gley. Ces derniers types de sols se présentent comme très défavorables pour l'agriculture.

1.3. Population

La dynamique de la population togolaise et ses implications sur les activités agricoles ont été ici analysées à travers les données des deux derniers recensements réalisés en 1981 et 2010. Les données du recensement de 2010 sont provisoires et donc susceptibles de modifications. Le taux d'accroissement annuel de la population togolaise pendant cette période de 30 ans serait de 2,58% avec une densité de 101 hts/Km² en 2010 contre 48 hts/Km² en 1981. Cette population est très jeune avec 44% des habitants qui ont moins de 15 ans et le nombre de femmes (51%) dépasse très légèrement celui des hommes (49%). La densité de la population togolaise est inégalement répartie. Elle est nettement élevée en milieu urbain qui regroupe sur un espace restreint 37% des 5,75 millions d'habitants dénombrés en 2010. La densité varie également selon les zones. Les zones à fortes densités sont la région Maritime (150 à 4500 hts/Km²), la partie nord de la région des Savanes, la partie est de la région de la Kara et le Sud-ouest de la région des Plateaux où les densités varient entre 150 et 450 hts/Km². Ces zones connaissent une forte pression démographique et ne disposent pratiquement plus de terres en friche.

La taille élevée et sans cesse croissante de la population urbaine constitue un réel potentiel de demande alimentaire et nécessite l'augmentation de la production agricole. Le caractère jeune de la population et son taux moyen de masculinité, constituent un atout à cette nécessité d'accroître la production agricole. Cependant, la densité qui a plus que doublé en 30 ans est un frein à l'agriculture itinérante et impose l'intensification des systèmes de production.

1.4. Agriculture

L'agriculture contribue à près de 40% à la formation du PIB national et est la principale activité économique du Togo. Elle est basée essentiellement sur la production végétale qui contribue à elle seule à 84% au PIB agricole. L'élevage (15% du PIB agricole) et particulièrement la pêche (1%) sont des activités agricoles secondaires bénéficiant de peu d'investissements tant en capital qu'en main d'œuvre. Selon le recensement agricole de 1996 (le plus récent), la production végétale comprend par ordre d'importance : (i) les vivriers dont les céréales (maïs, mil et

sorgho), les tubercules (igname et manioc) et les légumineuses (haricot et arachide), produits sur 81% des superficies emblavées et (ii) les produits de rente tels que le coton et le café-cacao qui étaient respectivement produits sur 14 et 5% des superficies emblavées. La part de la production végétale à la formation du PIB agricole observées dans les années 90 était essentiellement due au coton. En effet, de 1990 à 1994, le coton a occupé après le phosphate la deuxième place parmi les produits d'exportation et avait en moyenne contribué à la formation des recettes générées par ces produits de rente pour près de 32% (DSID, 1999). De 1995 à 1999, le coton avait pris le pas sur le phosphate et y en avait contribué à près de 43%. Depuis près d'une décennie, les superficies emblavées en coton ont fortement baissé au profit des cultures vivrières. Les superficies de coton qui étaient de 150 000 ha en 1998 sont tombées à 42 729 ha en 2008, soit une réduction de 72%. Les causes du désistement des agriculteurs à la production cotonnière sont entre autres (i) la baisse du prix d'achat de coton-graine et l'augmentation du prix des intrants agricoles suite à l'évolution défavorable des cours mondiaux, (ii) le retard de paiement des recettes de coton-graine en raison des difficultés financières de l'institution en charge de la filière puis (iii) l'endettement et le dysfonctionnement généralisés des groupements à la base. Dans ce contexte et selon les chiffres communiqués en 2010 par le Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche (MAEP), les vivriers contribuent aujourd'hui à près de 69% à la formation du PIB agricole contre seulement 5 et 4% pour le coton et le café-cacao respectivement.

1.4.1. Grandes aires de production des différentes cultures et d'élevage

En raison du caractère pluvial de l'agriculture togolaise, la dominance des cultures dépend fortement de l'aptitude pédoclimatique des régions (cf. paragraphes 1.1 et 1.2) et également des habitudes alimentaires des populations. Le maïs (premier produit alimentaire du pays) est cultivé sur près de 45% des superficies emblavées et essentiellement dans les régions Maritime, Plateaux et Centrale alors que le mil et le sorgho sont les principales céréales cultivées dans les régions de la Kara et des Savanes. Les agriculteurs des régions du nord adoptent de plus en plus la culture du maïs et ceux des régions du Sud, en particulier des Plateaux et Centrale, adoptent la culture du sorgho¹¹. L'igname est produite dans les zones disposant de terre en défriche (régions Centrale, Plateaux et la partie ouest de la Kara) tandis que le manioc est le principal tubercule produit dans la région Maritime. Le haricot est principalement produit dans la région des Plateaux et l'arachide dans celles de la Kara et des Savanes.

¹¹ Utilisé dans la préparation de boisson locale et des pâtes

Jusqu'en 1998 où sa production était encore intense, le cotonnier était cultivé dans toutes les régions du Togo à l'exception de la zone côtière immédiate de la région Maritime et une partie de la zone ouest de la région des Plateaux qui est exclusivement propice à la culture du café-cacao. En cette phase de production intense de coton, les régions des Plateaux et Centrale détenaient à elles seules jusqu'à 70% des productions nationales annuelles de coton-graine, qui ont varié entre 117 et 187 mille tonnes entre 1998 et 2003. Les faibles quantités de coton-graine produites aujourd'hui dans le pays (moins de 32 mille tonnes par an durant ces deux dernières campagnes agricoles) sont fournies à plus de 50% par les agriculteurs des régions des Savanes et de la Kara (DSP, 2009).

L'élevage est pratiqué essentiellement dans les régions septentrionales, en particulier dans la région des Savanes. Selon le même recensement agricole de 1996, la région des Savanes regroupe à elle seule 43% des effectifs nationaux de bovins (0,3 million), 33% des ovins (3,3 millions) et 27% des volailles (10 millions). D'une manière générale, l'élevage est une activité connexe à la production végétale et est pratiqué par moins de 75% des agriculteurs. Moins de 1% des agriculteurs pratiquent uniquement l'élevage contre plus de 25% qui produisent exclusivement des végétaux.

1.4.2. Systèmes de production agricole

Malgré l'importance de l'agriculture dans l'économie togolaise, elle est restée traditionnelle et peu fournie tant en engrais minéraux qu'en amendements organiques. Les chiffres communiqués par la CEDEAO sont indicatifs de la faible utilisation d'engrais minéraux dans le pays. Elles indiquent pour le Togo des utilisations moyennes annuelles d'engrais minéraux de $7,6 \text{ kg ha}^{-1}$ ($8,2 \text{ kg ha}^{-1}$ pour la zone CEDEAO) et sont largement plus faibles que les doses de 100 et 160 kg ha^{-1} rapportées respectivement au niveau mondial et en Asie (IFDC, 2005). Ces estimations, qui consistent à diviser les quantités disponibles d'engrais au niveau de chaque pays par les superficies emblavées, cachent toutefois la réalité. Selon les chiffres communiqués par le MAEP en 2010, seulement 16% des superficies emblavées au Togo sont fertilisées avec des doses d'engrais minéraux de près de 50 kg ha^{-1} . Ces chiffres sont comparables à ceux rapportés dans le cadre du recensement agricole de 1996 où 12% des superficies en vivriers ont été déclarées comme recevant des engrais minéraux ; indiquant ainsi une situation quasi stable. L'essentiel des engrais minéraux utilisés par les agriculteurs togolais sont acquis dans le cadre de la culture cotonnière qui est la seule filière leur donnant accès aux crédits intrants agricoles. Ainsi, et contrairement aux attentes des institutions en charge de la filière cotonnière, une partie

de ces engrais-coton acquis à crédit sert à fertiliser des portions de parcelles cultivées en vivriers (SOTOCO, 2003 ; Lawson, 2004). Les agriculteurs adoptent également des rotations culturales (coton/céréales) visant à préserver le rendement des vivriers à travers l'arrière effet des engrais minéraux appliqués en culture cotonnière. La filière cotonnière constitue donc un véritable facteur d'intensification de cette agriculture paysanne. Toutefois, avec la faible importance des superficies de coton (14%) devant celles des vivriers (81%) et notamment la baisse de 72% des superficies coton au cours de ces dernières années, ces systèmes cultureux préservent difficilement la fertilité minérale des sols sous culture.

Les systèmes de production agricole au Togo sont également caractérisés par des amendements organiques très faibles et régionalisés. Selon le recensement agricole de 1996, moins de 4% des parcelles cultivées reçoivent des amendements organiques au niveau national. Ils sont pratiqués essentiellement dans les régions septentrionales, notamment dans la région des Savanes qui dispose de la majeure partie du cheptel national et également des sols peu favorisés à la production végétale. D'autres pratiques que sont : (i) le brûlis systématique des résidus de récolte, (ii) la vaine pâture et (iii) l'utilisation des résidus de récolte en combustible domestique, rendent quasi nulles les restitutions organiques au sol sur les parcelles cultivées.

D'autres caractéristiques majeures des systèmes de production agricole au Togo sont le faible équipement en matériels agricoles et l'utilisation de variétés peu productives en cultures vivrières. Selon les chiffres communiqués par le MAEP en 2010, 89% des superficies sont emblavées avec du matériel aratoire (houe manuelle et coupe-coupe) et moins de 3% des parcelles cultivées en vivriers sont ensemencées avec des variétés améliorées. La pratique de la culture attelée a connu ses débuts, principalement dans les régions des Savanes (59% des attelages), de la Kara (37%) et dans une moindre mesure dans la Région des Plateaux (2%), mais les résultats n'ont pas été encourageants (DSID, 1995). A partir de 2007, le monde rural a été équipé en tracteurs. Les résultats restent encore peu perceptibles dans cette agriculture pluviale où le rendement des cultures justifie difficilement les coûts complémentaires induits par la mécanisation.

En conclusion, le Togo jouit des conditions pédoclimatiques favorables aux activités agricoles, avec toutefois des potentialités variables selon les régions. Hormis, (i) les zones à très fortes pentes et à affleurements rocheux qui sont répandues dans la partie Est de la région de la Kara, (ii) le littoral (région Maritime) et (iii) l'extrême Nord de la région des Savanes, les sols sont naturellement fertiles mais très fragiles dans leur ensemble. En conditions pluviales telles que s'exercent actuellement les activités agricoles, la région des Plateaux

bénéficie des conditions permettant une relative intensification : deux saisons agricoles par an avec des terres relativement disponibles et de bonne fertilité naturelle. La région Centrale et la partie ouest de la région de la Kara sont certes à une saison agricole, mais le niveau de fertilité naturelle des sols et leur relative disponibilité constituent de réelles potentialités agricoles de ces régions. Les régions Maritime et des Savanes sont quelque peu défavorisées pour la production végétale à cause de la saturation de l'espace agricole, la faible fertilité naturelle des sols et des conditions climatiques moins bonnes (pluviosité mal répartie et forte évapotranspiration).

II. Méthodologie

2.1. Sites de collecte de données

Les données ont été collectées : (i) sur différents points de recherche à travers les expérimentations de longue durée conduites en conditions contrôlées, (ii) sur des parcelles paysannes (conditions non-contrôlées) et (iii) à travers des enquêtes réalisées en milieu paysan.

2.1.1. Points de recherche en conditions contrôlées

Dans ce paragraphe, il est présenté les caractéristiques essentielles des points de recherche sur lesquels les expérimentations ont été conduites, sans décrire en détail les dispositifs expérimentaux. Chaque dispositif expérimental est décrit dans le chapitre où il est étudié.

Les expérimentations concernées par la présente étude ont été conduites sur les points de recherche de Kouvé, Kolokopé, Elavagnon, Dalanda et de Toaga qui sont situés dans les différentes zones agro-écologiques du Togo (Fig. 4). Le point de recherche de Kouvé est situé en terre de barre dans la zone pré-littorale. L'expérimentation conduite sur ce site a été désignée pour analyser l'effet de la dose de fertilisation minérale avec restitution au sol des résidus de récolte sur l'évolution de la fertilité du sol. Les points de recherche d'Elavagnon, Dalanda et de Kolokopé sont respectivement situés en sols ferrugineux, ferralitiques et vertiques de l'ensemble hydro-morphologique du Mono. L'expérimentation conduite à Elavagnon permet d'analyser l'effet des rotations culturales sur l'évolution de la fertilité du sol tandis que celle conduite à Dalanda permet d'étudier l'effet des formules de fertilisation minérale (incorporation et/ou omission de N, P et K) sur l'évolution de cette fertilité. Les travaux effectués à Kolokopé et présentés dans ce document concernent les caractéristiques initiales de sol sur une parcelle nouvellement défrichée. Les données de l'expérimentation proprement dite ne sont pas encore

disponibles. Cette analyse de données initiales de sol après une défriche met en exergue les difficultés relatives à l'utilisation de données d'expérimentations de longue durée. Enfin, le point de recherche de Toaga est situé sur sol hydromorphe de l'ensemble hydro-morphologique de l'Oti. L'expérimentation conduite sur ce dernier site a été désignée pour analyser l'effet sur l'évolution de la fertilité du sol de la présence/absence de la jachère de courte durée dans la rotation culturale.

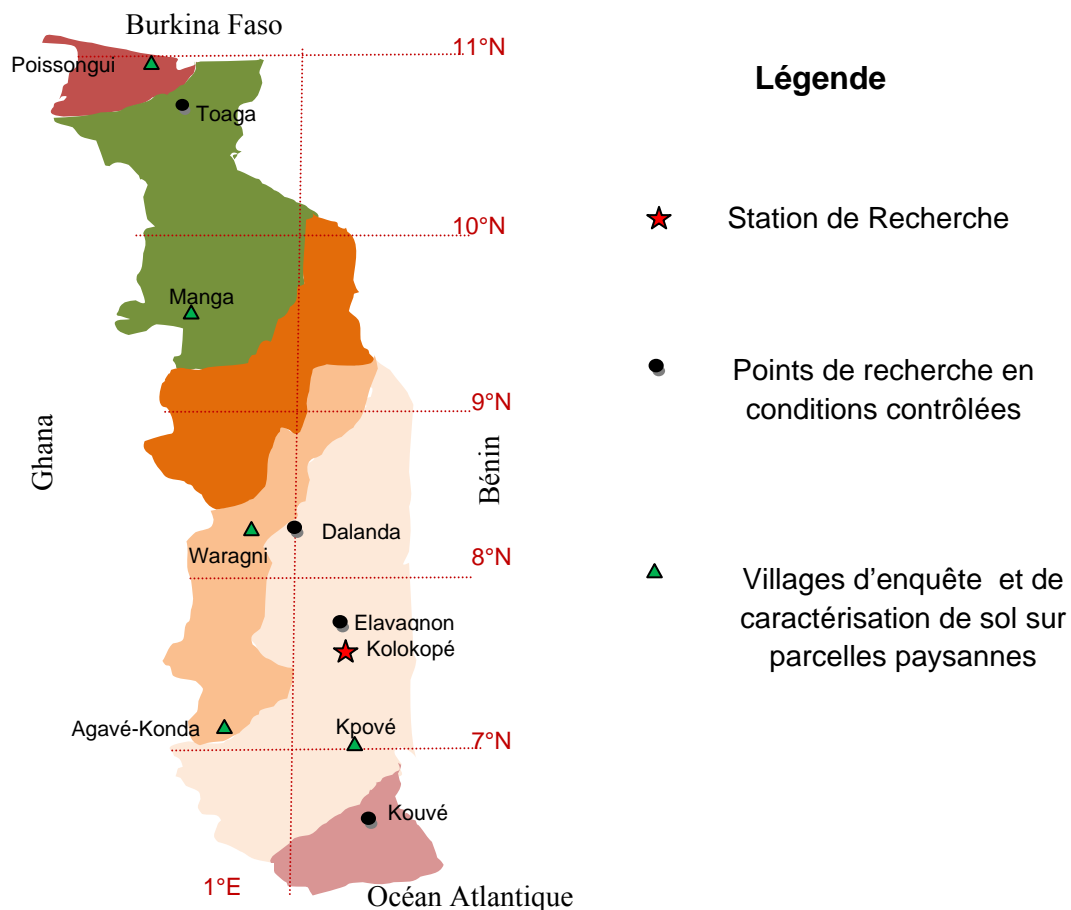


Figure 4 : Localisation géographique des points de recherche et villages d'enquête dans les différentes zones agro-écologiques.

La terre de barre du point de recherche de Kouvé présente des taux d'argile (type kaolinite) et des concentrations de C, N et P élevés à la défriche (Table 2). Contrairement aux sols ferrugineux du site d'Elavagnon et ferralitiques de celui de Dalanda, les vertisols du site de Kolokopé sont caractérisés de taux élevés de C et d'argiles gonflantes, leur conférant une CEC et des concentrations en bases échangeables fortement élevées (Table 2). Particulièrement, les sols du site de Dalanda ont une CEC très faible. Comme les sols ferralitiques de Dalanda, les sols hydromorphes du point de Toaga ont une CEC et des teneurs en P faibles mais sont légèrement plus riches en bases échangeables.

Table 2 : Position géographique et caractéristiques indicatives du sol (0-20 cm) des points de recherche en conditions contrôlées

Point de recherche	Coordonnée géographique	Granulométrie (%)		Eléments totaux			P Assimilable (mg kg ⁻¹)	Bases échangeables (Cmol ⁺ kg ⁻¹)*			CEC*	pH (1/2,5)
		Argile	Sable	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)		Ca	Mg	K		
Kouvé	N 6°41, E 1°25	17	83	14.0	1.28	222	41	5,00	2,00	0,30	5,7	6,1
Kolokopé	N 7°49, E 1°20	25	75	18.0	1.00	300	38	9,10	2,99	0,32	13	6,7
Elavagnon	N 7°58, E 1°21	6	94	7.3	0.64	208	17	4,49	1,12	0,16	6,2	6,6
Dalanda	N 8°38, E 1°00	4	96	4.7	0.34	90	9	1,56	0,39	0,18	3,1	6,2
Toaga	N 10°53, E 0°16	5	96	6.4	0.61	79	12	2,58	0,97	0,28	2,9	6,1

La pluviosité sur le point de recherche de Kouvé est très caractéristique de la zone bimodale, avec la petite saison sèche très marquée (Fig. 5). Le régime pluvial est peu différent sur les points d'Elavagnon, Dalanda et de Kolokopé. A Toaga, les hauteurs de pluies au cours des quatre premiers mois de l'année ne dépassent guère 50 mm et sont ainsi caractéristiques de la zone uni-modale sub-saharienne.

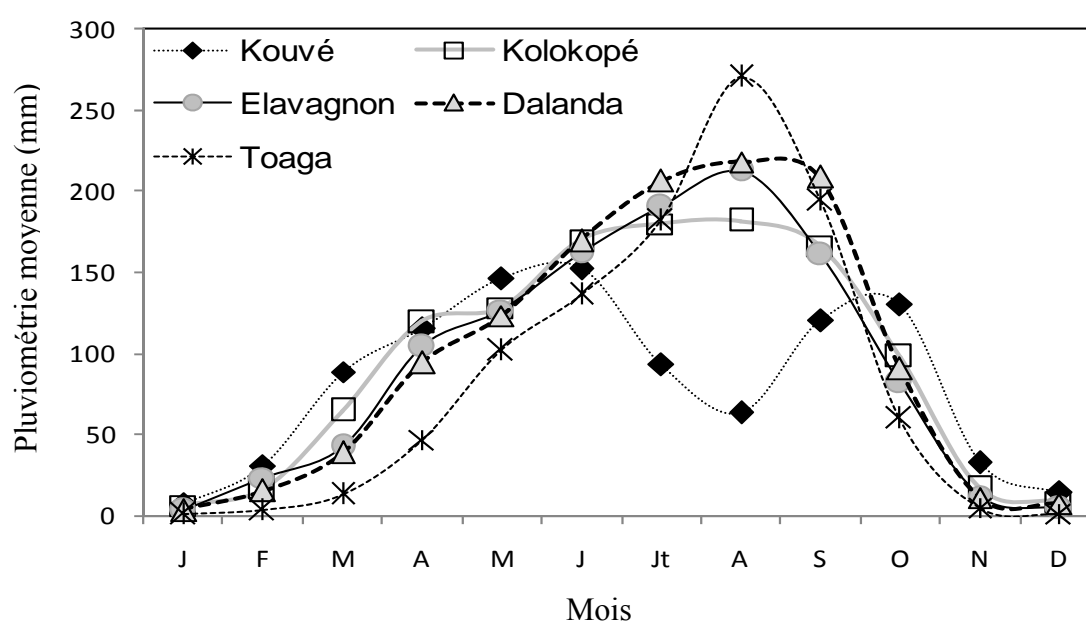


Figure 5 : répartition intra-annuelle de la pluviométrie entre 1977 et 2010 sur les points de recherche en conditions contrôlées.

2.1.2. Zone et approche d'enquêtes en milieu paysan et de collecte de données de sol sur des parcelles paysannes

2.1.2.1. Zone

Des enquêtes auprès des agriculteurs sur les pratiques culturales d'une part et la détermination d'autre part des indicateurs¹² de la fertilité de sol sur des parcelles paysannes ont été effectuées dans les villages de Kpové, Agavé-Konda, Waragni, Manga et Poissongui (Fig. 4). Ces villages sont des sites pilotes où l'ITRA conduit des travaux de recherche en conditions paysannes et des enquêtes agro-sociologiques. Ils sont situés dans les différentes zones agro-écologiques du pays et sont indicatifs de celles-ci à travers les systèmes culturaux existants. Le village de Kpové est situé dans l'ensemble hydro-morphologique du Mono. Les villages d'Agavé-Konda et de Waragni sont situés dans la zone montagneuse subhumide tandis que ceux de Manga et de Poissongui sont respectivement situés dans l'ensemble hydro-morphologique de l'Oti et dans la savane sèche continentale (Fig. 4).

2.1.2.2. Approche méthodologique

Dans le cadre d'un essai conduit en 1987 en milieu paysan, les indicateurs de la fertilité de sol avaient été déterminés sur dix parcelles paysannes dans chacun des villages ci-dessus cités et à raison d'une parcelle par paysan. Cette caractérisation agronomique de sol a été effectuée sur la profondeur 0-40 cm. L'essai n'a duré qu'un an et les parcelles ont, par la suite, été remises en exploitation par les paysans dans leurs pratiques traditionnelles de culture. En 2009, nous avons revisité les parcelles repérables¹³ pour prélever de nouveaux échantillons de sol qui ont été analysés afin de disposer un second état de caractéristiques agronomiques de ces parcelles. Au total 39 parcelles, à raison de 7 dans chacun des villages de Kpové et Waragni, 8 dans chacun des villages d'Agavé-Konda et Poissongui et 9 dans le village de Manga, ont pu être repérées. Un questionnaire a été administré auprès de chaque paysan afin de reconstruire le passé culturel¹⁴ de la parcelle. Un second questionnaire, afin de recenser les nouvelles adaptations de gestion de la fertilité de sol opérées par les agriculteurs suite à la baisse de la culture cotonnière, a été administré auprès d'un groupe plus large de paysans choisis au hasard. Quinze paysans par village ont été concernés par cette seconde interview. Ce nombre n'est pas, certes, représentatif de la population mais les moyens ont été une contrainte.

¹² Granulométrie, taux de C et d'éléments minéraux...

¹³ Le paysan concerné devra être présent dans le village et se souvient de l'emplacement de la parcelle

¹⁴ Cultures pratiquées, nombre d'années de jachère, amendements et gestion des résidus

2.2. Données

L'étude a utilisé les rendements de cultures observés dans le long terme en conditions contrôlées et les caractéristiques de sol.

2.2.1. Natures et méthodes d'analyses des paramètres de sol

Dans le cas des expérimentations de longue durée conduites à Kouvé, Elavagnon, Dalanda et Toaga et pour les observations de sol faites sur des parcelles paysannes, les analyses classiques de sol suivantes ont été effectuées à différents âges : granulométrie, teneurs en C et N totaux, P assimilable et total, pH, CEC et concentrations en bases échangeables. En plus de ces analyses classiques, la quantité de C du sol résistant à la minéralisation a été déterminée sur les échantillons de sol prélevés en 2007 dans le cas des expérimentations conduites à Elavagnon et Dalanda. Les analyses de sol effectuées dans le cas de la parcelle expérimentale de Kolokopé sont : le taux de C total du sol, la composition isotopique de C du sol et sa vitesse de minéralisation.

2.2.1.1. Analyses classiques de sol

Granulométrie

La granulométrie en cinq fractions a été réalisée avec le granulomètre automatique « Texsol », selon le principe de la norme AFNOR X 31-107 (AFNOR, 1987).

Dosage de C et de N totaux

Le C total du sol a été dosé à la méthode de Walkley-Black (Walkley and Black, 1934). Cette méthode consiste à oxyder par voie humide le C organique du sol avec une solution en excès de bichromate de potassium et en présence de l'acide sulfurique. L'excès de bichromate (non-réduit par le C organique) est titré avec le sel de Mohr 0,5 M. L'oxydation de C n'est que partielle (77%) et un coefficient de 1,33 est alors appliqué à la quantité oxydée de C pour obtenir la quantité de C total de l'échantillon de sol analysé.

Le dosage de N total du sol a été effectué à la méthode de Kjeldahl (Hanotiaux et *al.*, 1975). La méthode consiste à attaquer N organique du sol avec l'acide sulfurique bouillant afin de le transformer en N ammoniacal. L'ammoniac est déplacé par distillation en présence de la soude 10N et recueilli dans une solution d'acide borique et est directement dosé par de l'acide sulfurique N/50.

Dosage de P assimilable et total

Le P assimilable a été extrait à la méthode Olsen (Olsen et *al.*, 1954). L'extraction a été faite avec une solution de bicarbonate de sodium 0,5 N et de fluorure d'ammonium 0,5 N, dans un rapport sol/solution de 1/50 pendant 1 heure. Les concentrations du sol en P total ont été déterminées par attaque à l'acide nitrique concentré et bouillant (Dabin, 1956).

Analyse du complexe échangeable

Le complexe échangeable a été analysé selon deux méthodes. La méthode à l'acétate d'ammonium a été utilisée pour les analyses de sol effectuées avant 1981 et après 1985. Celle au chlorure de cobaltihexamine a été utilisée pour des analyses effectuées entre 1981 et 1985. Sur les échantillons de sol prélevés en 2007 (Elavagnon et Dalanda) et en 2008 (Toaga), nous avons effectué les deux méthodes d'analyse et les résultats sont fortement corrélés (Ciesielski et *al.*, 1997) :

(1) $CEC_{act} = 0,914 * CEC_{cob} + 0,38$, $r^2 = 0,96$, $n = 50$, où CEC_{act} et CEC_{cob} sont la CEC déterminée à la méthode acétate et cobaltihexamine respectivement.

(2) $Ca_{act} = 1,048 * Ca_{cob} + 0,081$, $r^2 = 0,99$.

(3) $Mg_{act} = 1,025 * Mg_{cob} + 0,026$, $r^2 = 0,99$.

(4) $K_{act} = 0,908 * K_{cob} + 0,022$, $r^2 = 0,84$.

Ces relations ont été appliquées pour déterminer l'équivalent à la méthode acétate du complexe échangeable analysé avec la méthode cobaltihexamine entre 1981 et 1985.

La méthode à l'acétate d'ammonium consiste à percoler les bases échangeables au moyen de l'acétate d'ammonium utilisé en excès et à pH 7. L'excès d'ammonium est éliminé avec l'alcool éthylique absolu et les bases échangeables sont dosées dans l'extrait d'acétate par Inductive Couplet Plasma (ICP). L'ammonium fixé est déplacé par une solution de chlorure de sodium 1,0 M et dosé par colorimétrie sur auto analyseur Evolution de Alliance Instrument.

Pour la méthode au chlorure de cobaltihexamine, l'échange des ions est effectué dans un rapport sol/solution de 1/20 pendant 2 heures et le pH est mesuré sur une aliquote nonfiltrée. Les bases échangeables sont dosées par ICP et la CEC est obtenue par différence entre le cobalt apporté et restant dans la solution.

Détermination du pH-eau

La mesure de pH-eau a été effectuée dans un rapport sol/solution de 1/2,5 après 2h30 de contact, selon la norme NF ISO 10390 (Solomon et *al.*, 2007).

2.2.1.2. Détermination de C du sol résistant à la minéralisation

La méthode d'hydrolyse acide décrite par Zimmermann et *al.* (2007) a été utilisée pour quantifier le C résistant à la minéralisation dans les échantillons de sol prélevés en 2007 dans le cas des expérimentations conduites à Elavagnon et Dalanda. La méthode consiste à fractionner la terre fine en deux fractions, inférieure et supérieure à 50 μm . Le C contenu dans la fraction < 50 μm est ensuite hydrolysé (Fig. 6).

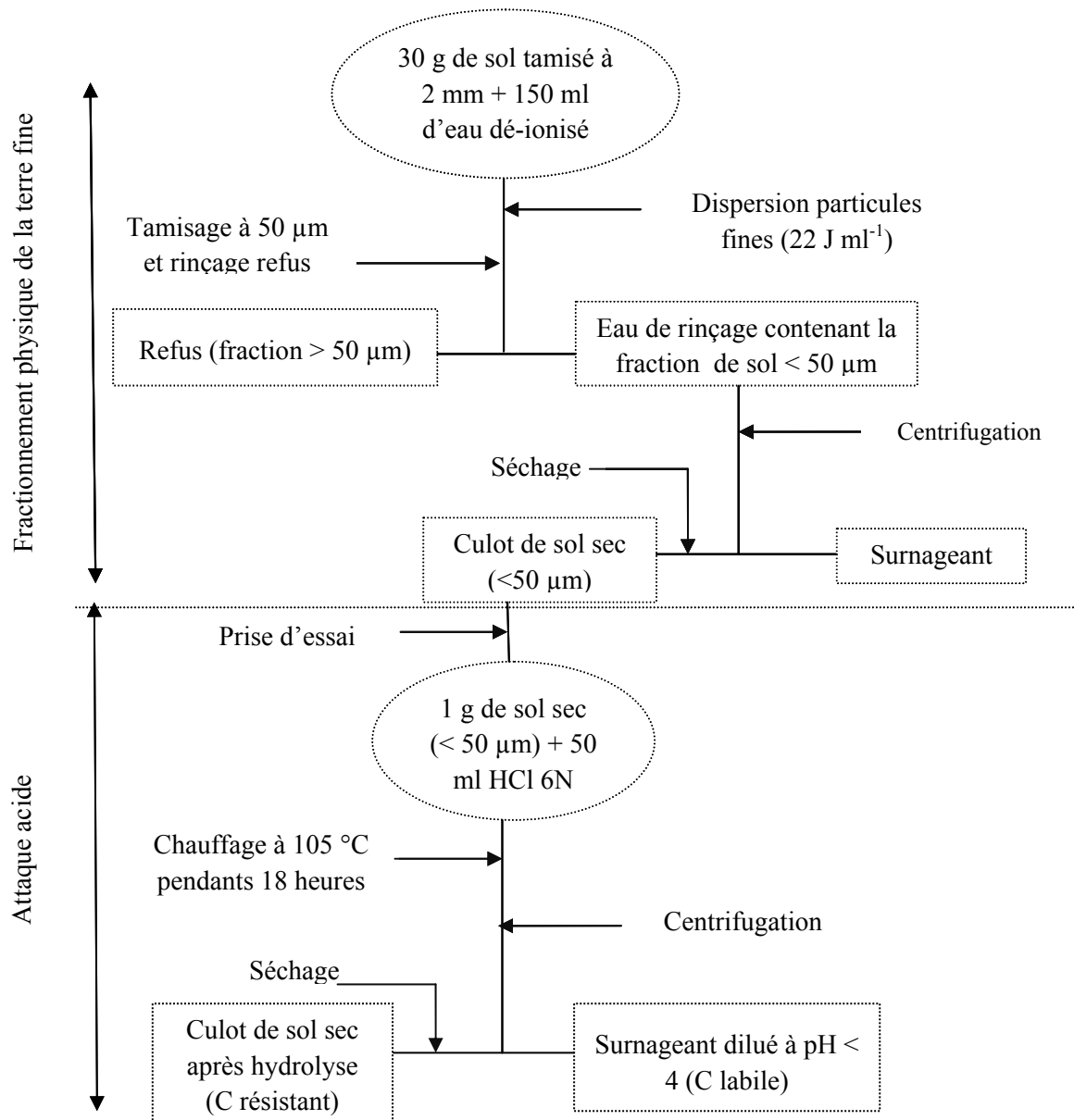


Figure 6 : schéma analytique de C du sol résistant à la minéralisation

Fractionnement physique de l'échantillon de sol

L'objectif visé à travers le fractionnement physique de l'échantillon de sol est d'extraire la MOS fraîche qui n'est pas stable et contiendrait de la lignine non-hydrolysable par l'acide (Collins *et al.*, 2000). Un mélange de 30 g de terre fine ($< 2 \text{ mm}$) et de 150 ml d'eau dé-ionisée a été agité pendant 18 minutes dans un ultrason de 185 W heure^{-1} ; pour ainsi fournir à la suspension de sol une énergie de 22 J ml^{-1} . Cette énergie est celle permettant de ne disperser que les particules fines (argile et limon) du sol (Balesdent *et al.*, 1991, Amelung and Zech, 1999). La suspension de sol ainsi dispersé a été tamisée à $50 \text{ }\mu\text{m}$. Le refus de sol au tamisage (fraction $> 50 \text{ }\mu\text{m}$ et contenant de la MOS fraîche) a été rincé avec l'eau dé-ionisée afin de le débarrasser complètement de particules fines. L'eau de rinçage (contenant la fraction $< 50 \text{ }\mu\text{m}$) a été trois fois centrifugée à 7000 tours/min et pendant 10 minutes toutes les fois. Après chaque centrifugation, l'eau surnageant est récupérée. Le culot de sol obtenu après les trois centrifugations ($< 50 \text{ }\mu\text{m}$) et le refus de terre fine au tamis ($> 50 \text{ }\mu\text{m}$) ont été séchés à l'étuve à $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 12 heures. Ils ont été pesés et leurs poids secs respectifs, $P_{>50\mu\text{m}}$ et $P_{<50\mu\text{m}}$ pour la fraction supérieure et inférieure à $50 \text{ }\mu\text{m}$, ont été notés. Les concentrations en C et N de la fraction $< 50 \text{ }\mu\text{m}$ ont été déterminées au Carlo Erba et les quantités correspondantes ont été évaluées en multipliant chaque concentration par le poids sec de sol ($P_{<50\mu\text{m}}$). Les quantités de C et N dans la fraction $> 50 \text{ }\mu\text{m}$ ont été déduites par différence entre celles dans la terre fine initiale et dans la fraction $< 50 \text{ }\mu\text{m}$.

Hydrolyse acide

L'hydrolyse a été effectuée sur la fraction de sol $< 50 \text{ }\mu\text{m}$, supposée contenir le C résistant du sol. Un mélange de 1 g de cette fraction de sol et de 50 ml d'HCl 6N a été chauffé à $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 18 heures dans une rampe à minéralisation. Chaque échantillon de sol, correspondant aux traitements testés dans le cas de chaque dispositif expérimental, a été hydrolysé en trois répétitions. Le ratio sol/acide (1/50), la molarité de l'acide et le temps d'hydrolyse adoptés ici ont été rapportés comme hydrolysant au maximum le C du sol (Rovira *et al.*, 2007 ; Zimmermann *et al.*, 2007 ; Silveira *et al.*, 2008). Le mélange (sol + acide) ainsi chauffé a été trois fois centrifugé à 7000 tours/min et pendant 15 minutes toutes les fois. Pour faciliter la décantation du mélange lors de la centrifugation, de l'eau dé-ionisée a été chaque fois ajoutée afin d'augmenter le volume à 150 ml. Après chaque centrifugation, la solution surnageant (contenant C labile hydrolysé) est récupérée puis le total a été dilué avec l'eau dé-ionisée jusqu'à obtenir un pH inférieur à 4 ; qui correspond à la gamme d'étalonnage de l'appareil de mesure. Le volume total de la solution ainsi obtenue a été noté (V) et la solution a été

conservée à 4 °C. Sa concentration en C ($[C_{lab}]$) a été déterminée au TOC (Total Organic Carbon). Le culot de sol récupéré après chauffage-acide suivi de trois centrifugations a été séché à 60 °C pendant 12 heures et son poids sec a été noté (P_{sh}). Sa concentration en C ($[C_{sh}]$) a été déterminée au Carlo Erba. Les quantités de C résistant à la minéralisation (QCr) et de C labile (QC_{lab}) contenues dans la prise d'essai de 1 g de sol < 50 µm sont respectivement données par :

$$QCr = P_{sh} * [C_{sh}]$$

$$QC_{lab} = V * [C_{lab}].$$

2.2.1.3. Données initiales de sol sur la parcelle expérimentale de Kolokopé

Une parcelle qui avait été laissée en jachère pendant 10 ans environ, a été désignée pour installer en 2010 un nouveau dispositif expérimental. Les caractéristiques initiales de sol suivantes ont été déterminées : teneur en C, composition isotopique de C et vitesse de minéralisation de C. Ces données ont été utilisées dans cette thèse pour étayer certaines informations et montrer les difficultés liées à l'utilisation des données relatives aux expérimentations de longue durée. Le suivant paragraphe décrit le mode d'échantillonnage de sol sur la parcelle et la méthodologie de chaque type d'analyse de sol effectuée.

Mode d'échantillonnage de sol

Avant la défriche de la parcelle expérimentale (1 ha), 154 échantillons de sol ont été prélevés à raison de 77 échantillons pour chacune des profondeurs 0-5 et 10-15 cm (Fig. 7). Chaque échantillon de sol a été obtenu par mélange de 5 sondages de sol effectués au centre et sur une circonférence d'environ 2 m de diamètre.

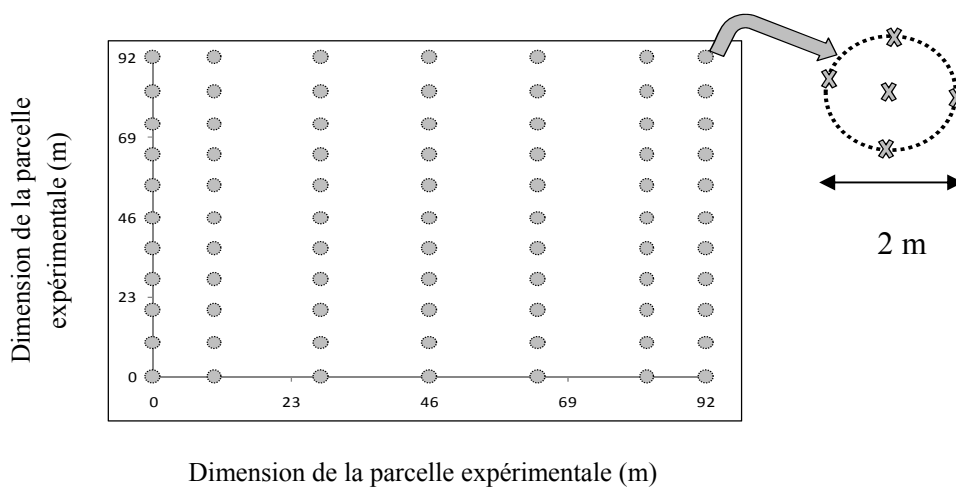


Figure 7 : points et mode d'échantillonnage de sol sur la parcelle expérimentale de Kolokopé

Dosage de C total et analyse isotopique de C du sol

Le dosage de C organique total des 154 échantillons de sol a été effectué au Carlo Erba et leur composition isotopique a été déterminée au spectromètre de masse (Girardin and Mariotti,

1991 ; Mathieu, 2005). Le rapport isotopique est donné par : $\delta^{13}\text{C}_{\text{‰}} = \frac{R_{\text{échantillon}} - R_{\text{référence}}}{R_{\text{référence}}} \cdot 1000$

Où $R_{\text{échantillon}}$ est le rapport de la concentration de l'isotope ^{13}C par celle de l'isotope ^{12}C dans l'échantillon de sol et $R_{\text{référence}}$, ce rapport pour la référence isotopique. La référence utilisée est le standard USGS40 dont les caractéristiques sont : $\delta^{13}\text{C} = -26,2\text{‰}$ et $\%C = 40,82\%$.

Evaluation de la vitesse de minéralisation du carbone organique du sol

Après que le rapport isotopique ($\delta^{13}\text{C}$) des 154 échantillons de sol est connu, nous avons constitué pour chacune des deux profondeurs, trois échantillons composites de sol en mélangeant des quantités égales¹⁵ (i) des 10 premiers échantillons qui ont des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ les plus élevées, (ii) des 10 échantillons qui ont des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ intermédiaires et (iii) des 10 derniers dont les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont les plus faibles. L'objectif d'un tel mélange est d'avoir des quantités suffisantes de sol et aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ assez contrastées. La vitesse de minéralisation de C organique a été évaluée par incubation après avoir évalué la capacité au champ (CAPAC) des échantillons composites de sol constitués.

La détermination préalable de la CAPAC a pour objectif de préciser la quantité d'eau à ajouter à l'échantillon de sol lors de l'incubation. La CAPAC a été déterminée suivant le schéma présenté à la figure 8. Une prise de 20 g de terre fine a été suffisamment saturée d'eau dans un filtre de Büchner à verre fritté. L'échantillon de sol humidifié a été ensuite soumis à une dépression modérée équivalente à 1/3 de la dépression atmosphérique, au moyen d'une pompe aspirante. Lors de ce ressuyage, la surface supérieure du filtre de Büchner a été couverte avec une éponge humidifiée afin d'empêcher le contact de l'échantillon de sol avec l'air sec qui le dessècherait. L'échantillon de sol ainsi ressuyé (contenant un reste d'eau équivalente à la CAPAC) a été pesé (P_1). Il a été ensuite séché à l'étuve à 105 °C pendant une heure et son poids sec a été déterminé (P_2). La CAPAC (%) est calculée par la relation : $\text{CAPAC} = 100 \cdot (P_1 - P_2)/P_2$. Pour chacune des deux profondeurs, la CAPAC a été évaluée en cinq répétitions.

¹⁵ Ainsi la concentration et le rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}$ de l'échantillon composite se déduisent comme la moyenne de ceux des échantillons mélangés

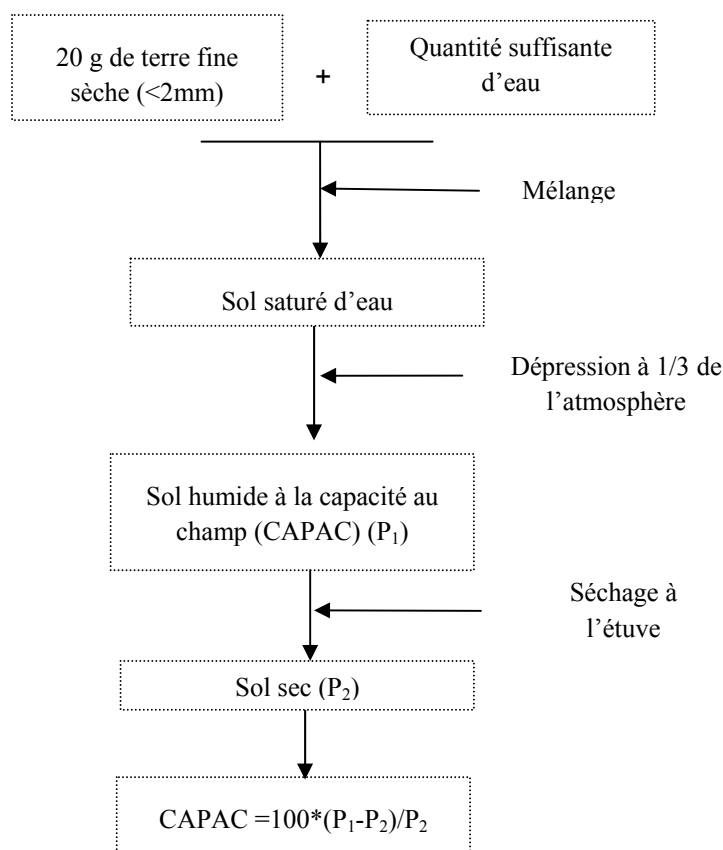


Figure 8 : détermination de la capacité des échantillons de sol

Chacun des six échantillons composites de sol a été incubé en trois répétitions. Dans chaque fiole de 320 ml, 10 ml d'eau ont été ajoutées à 40 g de terre fine (taux d'humidité initiale d'environ 2%) afin de l'humidifier à 80% de la CAPAC (Bossuyt et *al.*, 2002 ; Dominy and Haynes, 2002). A l'aide d'une spatule, le mélange eau+sol a été homogénéisé dans la fiole et l'ensemble a été pesé. Les fioles ont été scellées puis incubées à l'étuve à 28 °C pendant 52 jours (après une pré-incubation de 3 jours). Deux échantillons de CO₂ émis ont été prélevés avant la mise en incubation (état initial) et aux 7^{ème}, 14^{ème}, 21^{ème}, 35^{ème} et 52^{ème} jours d'incubation. Un échantillon de CO₂ prélevé est destiné à mesurer la concentration de C minéralisé et l'autre sa composition isotopique. Les échantillons de gaz destinés à mesurer la quantité de C minéralisé ont été prélevés les premiers, dans des fioles de 10 ml préalablement scellées et mises sous vide à 6 10⁻² mbar. Les gaz destinés à déterminer la composition isotopique de C minéralisé ont été ensuite prélevés dans des fioles de 37 ml, scellées et préalablement mises sous vide également. Après le prélèvement des deux échantillons de CO₂, les fioles d'incubation (320 ml) sont ouvertes et les gouttes d'eau formées sur les parois sont nettoyées. Quelques gouttes d'eau y sont ajoutées jusqu'à obtenir le poids initial de l'ensemble fiole+sol+eau. Afin de supprimer toute trace de CO₂, les fioles d'incubation ont

été après chaque série de prélèvement de gaz, ventilées avec de l'air sans CO₂ (mélange de 80% N₂ et 20% O₂). Après s'être ventilées, les fioles sont ré-scellées puis remises en incubation jusqu'au prochain jour de prélèvement de gaz.

Les concentrations en CO₂ des échantillons de gaz prélevés ont été déterminées à l'aide d'un Chromatographe en Phase Gazeuse (CPG) (Agilent 7890A) qui est équipé d'un détecteur Thermal Conductivity Detector, chauffé à 250°C. L'injecteur (250°C) a été réglé en mode de division¹⁶ (split) 10/1 avec un flux d'hélium total de 19,5 ml min⁻¹. La séparation a été effectuée sur une colonne chromatographique HP-PLOT/Q de 30 m et le four a été chauffé à 30 °C. La composition isotopique de C minéralisé (seconde série de CO₂ prélevé) a été déterminée au moyen d'un spectromètre de masse.

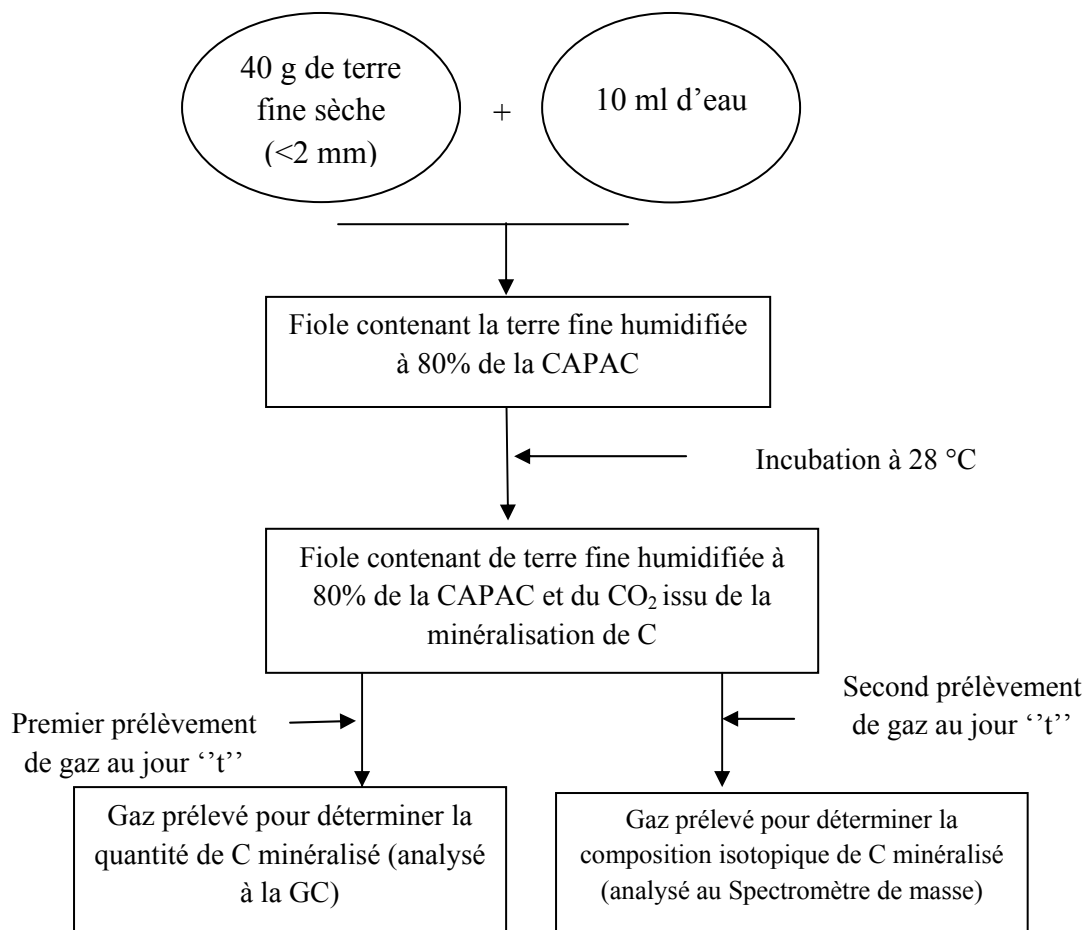


Figure 9 : détermination de la quantité et de la composition isotopique de C minéralisé lors de l'incubation de l'échantillon de sol

¹⁶ Division 10/1 : indique que la quantité de gaz entraînée par le flux d'hélium a été répartie à raison de 10 et 1 ml dans la purge et dans la colonne chromatographique respectivement.

2.3. Analyse des données

Les données synchroniques de sol observées dans le cadre des expérimentations de longue durée ont été analysées au moyen des modèles d'évolution du stock de C du sol et du bilan minéral. Le modèle QUEFTS a été utilisé pour analyser la potentialité du sol à fournir de nutriments aux cultures dans le long terme. Les résultats d'hydrolyse acide, d'incubation et le rapport isotopique de C ont servi à expliquer, confirmer ou infirmer les résultats obtenus à travers les simulations. Comme les dispositifs expérimentaux, chacun de ces outils d'analyse a été en détail décrit dans le chapitre où il est utilisé.

Chapitre 3

Modélisation de l'évolution du stock de C des sols cultivés en zone cotonnière du Togo et caractérisation du compartiment stable de C du sol

Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre a été d'identifier les modèles qui décrivent mieux l'évolution du stock de C des sols cultivés en zone cotonnière du Togo. Ce choix a été effectué en deux étapes. Dans un premier temps et à travers une publication, trois modèles de complexité variable ont été testés en les appliquant aux données de deux expérimentations conduites durant plus de 30 ans à Elavagnon et Dalanda. Les modèles testés sont : (i) le modèle de Hénin-Dupuis (HD) qui considère tout le stock de C du sol labile, (ii) le modèle AMG qui le considère en deux compartiments dont un stable et l'autre labile et (iii) le modèle RothC qui considère le stock de C en cinq compartiments dont un stable et les autres labiles avec différents taux de minéralisation. La performance des modèles a été analysée à travers la qualité d'ajustement entre les stocks simulés et observés en utilisant des ratios statistiques. A la seconde étape, le stock de C stable supposé par le paramétrage des modèles a été confronté au stock de C résistant évalué par hydrolyse acide d'échantillons de sol. Pour étayer la différence inter-site observée dans la taille de C stable, la vitesse de minéralisation de C du sol en fonction de sa composition isotopique a été évaluée par incubation. Un objectif connexe au choix des modèles a été d'analyser sur l'évolution du stock de C et des rendements de cultures l'impact des rotations culturales et des formulations d'engrais minéraux avec et sans restitution au sol des résidus de récolte.

Les résultats ont montré que le stock de C d'environ 15 t ha^{-1} à la mise en place des expérimentations (quelques années après la défriche) a baissé de près de 3 t ha^{-1} pour atteindre l'équilibre après seulement 10-15 ans de culture. La baisse du stock de C a été peu influencée par les rotations culturales et des formulations de fertilisation minérale. Cette baisse du stock de C a été mieux décrite avec le modèle AMG. Le modèle RothC et surtout celui de HD tendent à sous-estimer le stock d'équilibre de C de ces sols. Le coefficient isohumique de C (K_1) paramétré avec le modèle AMG a été de 0,25 et le taux de minéralisation du stock de C labile (K_2) de 0,15-0,20. La quantité de C stable a été en moyenne de 10 t ha^{-1} à Elavagnon et 8 t ha^{-1} à Dalanda et représente 60-67% des stocks totaux à la mise en place des expérimentations. La quantité de C ayant résisté à l'hydrolyse

acide (HCl) représente environ 30% des stocks totaux à la mise en place des expérimentations. Cette existence de C résistant à l'hydrolyse HCl conforte la faible performance du modèle HD à simuler l'évolution du stock de C de ces sols. La fraction de C résistant à l'hydrolyse HCl est plus faible que la fraction de C stable supposée par le modèle AMG et est fortement plus élevée que celle supposée par Roth C (7% du stock initial). L'hypothèse que dans des conditions ambiantes du sol, les microorganismes puissent dégrader le C ayant résisté à cette hydrolyse jusqu'à approcher 7% du stock initial tel que supposé par le modèle Roth C semble peu probable. Les résultats d'incubation d'échantillons de sol (température = 28°C, taux d'humidité = 80% de la capacité au champ) ont montré une vitesse de minéralisation de C plus faible pour les échantillons de sol riches en C des plantes à photosynthèse C₃ que pour ceux riches en C des plantes à photosynthèse C₄. Ces résultats expliquent en partie le stock plus élevé de C stable simulé à Elavagnon où la végétation initiale était une forêt (C₃) qu'à Dalanda où il s'agissait d'une savane. Pour tous les systèmes de culture testés, les rendements initiaux de coton-graine et de céréales qui étaient de 1,5-2 et 2-3 t ha⁻¹ respectivement ont baissé pour ne représenter qu'environ 1 t ha⁻¹ après les 20 premières années d'expérimentations, malgré l'application continue de la fertilisation NPK.

I. Article

Carbon losses and primary productivity decline in savannah soils under cotton-cereal rotations in semiarid Togo

K. Kintché¹, H. Guibert^{2,3}, J.M. Sogbedji⁴, J. Levêque⁵, P. Titttonell^{2*}

¹Institut Togolais de Recherche Agronomique, Centre de Recherche Agronomique de la Savane Humide, BP 01&02 Anié, Togo.

²CIRAD-Persyst, URSCA, TA B-102/02 Avenue Agropolis, 34898 Montpellier Cedex 5, France

³INRAB, CRA-CF, 01 BP 715, Cotonou, Bénin.

⁴ Université de Lomé, ESA, BP 1515, Lomé, Togo.

⁵Université de Bourgogne, UMR BIOGEOSCIENCES, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

*Correspondance: CIRAD-Persyst, URSCA, TA B-102/02 Avenue Agropolis, 34898 Montpellier Cedex 5, France. Email: pablo.tittonell@cirad.fr

Plant and Soil

(Publié en ligne le 10 août 2010)

Abstract

Soil degradation in the savannah-derived agroecosystems of West Africa is often associated with rapid depletion of organic carbon stocks in soils of coarse texture. Field experiments conducted over more than 30 years at two sites in semiarid Togo to test the impact of agricultural management practices on soil C stocks and crop productivity were analysed with the aid of dynamic simulation models of varying complexity, to study the impact of crop rotation, fertiliser use and crop residue management on soil C dynamics. The models were then used to calculate the size of the annual C inputs necessary to restore C stocks up to desirable thresholds that allow positive crop responses to fertilisers under continuous cultivation. Yields of all crops declined over the 30 years irrespective of crop rotation, fertiliser use or crop residue management. Both seed-cotton and cereal grain yields with fertiliser fluctuated around 1 t ha⁻¹ after 20 years. Rotations that included early maturing sorghum varieties provided larger C inputs to the soil through residue biomass; around

2.5 t C ha⁻¹ year⁻¹. Soil C stocks, originally of 15 t ha⁻¹ after woodland clearance, decreased by around 3 t ha⁻¹ at both sites and for virtually all treatments, reaching lower equilibrium levels after 5-10 years of cultivation. Soil C dynamics were well described with a two-pool SOM model running on an annual time step, with parameter values of 0.25 for the fraction of resistant plant material (K_1), 0.15-0.20 for the decomposition rate of labile soil C (K_2) and 8-10 t C ha⁻¹ for the fraction of stable C in the soil. Simulated addition of organic matter to the soil 30 years after woodland clearance indicated that additions of 3 t C ha⁻¹ year⁻¹ for 15-20 years would be necessary to build 'threshold' soil C stocks of around 13 t ha⁻¹, compatible with positive crop response to fertilizer. The simulated soil C increases of 0.5 to 1.6% per year are comparable with results from long-term experiments in the region. However, the amounts of organic matter necessary to build these soil C stocks are not readily available to resource-poor farmers. These experimental results question the assumption that crop residue removal and lack of fertiliser input are responsible for soil C decline in these soils. Even when residues were incorporated and fertilisers used at high rates, crop C inputs were insufficient to compensate for C losses from these sandy soils under continuous cultivation.

Keywords: Sub-Saharan Africa; Soil fertility; Carbon; Fertilisers; Residue management; SOM modelling

1. Introduction

Soil degradation in the savannah-derived agroecosystems of West Africa is often associated with rapid depletion of soil organic carbon stocks (Bationo et al. 2006). The contribution of organic matter to soil quality is particularly important in these coarse textured soils, where it contributes largely to macro-nutrient availability, cation exchange capacity, acidity regulation, and physical aggregation (Bezdicsek et al. 1996). Agricultural management decisions such as choice and sequencing of crop rotations, use of mineral or organic fertilisers, frequency of cultivation, and tillage practices have major impacts on primary productivity and stabilisation of organic carbon in the soil. In particular, the removal of crop residues by grazing, burning or collection after harvest regulates the input of organic C to soil every year. In the absence of sufficient quantities of animal manure for soil amendment, mineral fertilisers may not only supply nutrients for plant growth but could also increase soil C inputs through increased primary productivity. Such a strategy is currently promoted by numerous donor-funded initiatives to restore soil fertility in Africa (e.g. Smaling 2007).

The simulation of long-term changes in soil organic carbon allows the impact of agricultural practices on soil C dynamics to be assessed, and options to maintain/restore soil productivity over time to be explored (Verberne et al. 1990; van Keulen 2001). Here, we propose the use of dynamic modelling to analyse the long-term evolution of organic C content in a sandy West African soil as affected by agricultural management practices under typical cotton-cereal rotations. The various approaches to modelling long-term soil C changes differ in at least two basic characteristics: (i) the number of pools or compartments into which soil organic matter is divided, and (ii) the degree to which soil environmental effects (chiefly temperature and moisture) regulate organic matter decomposition.

Different multi-compartment models divide soil organic matter into 3, 4 or 5 pools which may or may not be associated with measurable soil fractions (Jenkinson et al. 1987; Parton et al. 1987; Hansen et al. 1991; Nicolardot et al. 1994). Smith et al. (1997) evaluated nine different multi-compartment soil carbon models through a number of fitness indicators, on case studies from temperate regions, and indicated that the Roth-C (Jenkinson and Rayner 1977) and Century (Parton et al. 1987) were amongst the best performing models. The Roth C model has been widely used to simulate soil C dynamics in temperate regions, and its compartments have been related to measurable soil C pools (Zimmerman et al. 2007). Although its use in the tropics has been less extensive (e.g. Diels et al., 2004), Roth-C remains a reference model for soil organic C simulation. Multi-compartment models use empirical functions to analyse the effect of the soil environment by relating soil clay content, temperature and moisture to rate modification coefficients in order to calculate the decomposition rate for each C pool. This approach may also be introduced in mono-compartment models, such as that of Yang and Janssen (2000). However, most models that consider 1 or 2 compartments do not explicitly state how the effects of the environment are integrated into their rate calculations (e.g., Hénin and Dupuis 1945; Kortleven 1963; Sauerbeck and Gonzalez 1977).

For applicability in data-scarce environments, where even basic climatic data may be rare, simple models that do not account explicitly for the environment may be more advantageous; they are less demanding in data for initialisation, they present only a few parameters to be calibrated, and they usually run on an annual time step. The degree to which model performance may be lost, however, due to increasing simplification of process description should be weighed against the objectives and research question being assessed (Tittonell et al. 2010). Using experimental data and recent measurements from two 30-year experiments in Central Togo, we studied the long-term dynamics of organic C in savannah-derived sandy

soils using modelling approaches of varying complexity. Our objectives were (i) to assess the effect of crop rotation, frequency of cultivation, mineral fertiliser use and crop residue management on soil C dynamics, and (ii) to calculate the size of the annual C inputs necessary to restore soil C stocks up to threshold levels that are compatible with positive crop responses to fertilisers under continuous cultivation. An associated objective was to assess the performance of simple models in describing the changes observed, to evaluate their potential for broader scale studies and/or in data-scarce situations.

2. Materials and methods

2.1. Site characterisation

Two long-term experiments on annual cropping systems representing locally common crop rotations and cultural practices were established at Elavagnon (N 7° 58', E 1° 21') and Dalanda (N 8°38', E 1°00') in Central Togo. Seasonal rainfall patterns are similar at both sites, with peaks in July-August. Between 1977 and 2007 the sites at Elavagnon and Dalanda received averages of 1152 ±220 and 1185 ±360 mm per year, respectively, with stronger inter-annual variation at the latter. Maximum air temperatures are slightly lower at Elavagnon than at Dalanda (33.1 vs. 34.2°C); minimum temperatures are similar at both sites (19.5 vs. 20.6°C), except in the period November-January, when they are cooler at Dalanda (20.8 vs. 14.6 °C). Minimum and maximum evapo-transpiration rates are recorded at both sites in August and in March, respectively. Evapo-transpiration remains higher than rainfall during 8 months of the year. Dominant soils at both sites are sandy ferric Alfisols with average clay content of 5 and 3.5% at Elavagnon and Dalanda, respectively. Soil characteristics at the start of the experiments are presented in Table 1. A major difference between the sites was the intensity of cultivation, as two crops per year were grown at Elavagnon and only one at Dalanda. Traditional cropping at Elavagnon consists of planting maize in April-May, and cotton, sorghum and cowpea in June-July. There is only one cropping season per year at Dalanda, starting in April-June for both cereals and cotton.

Table 1: Average soil characteristics in uppersoil 20 cm at both sites at the start of the experiment (values between brackets indicate standard deviations)

Site	Soil characteristics					
	Clay (%)	Organic C (t C ha ⁻¹)	Organic N (t N ha ⁻¹)	Available P (t P ha ⁻¹)	Exchangeable K (t K ha ⁻¹)	pH water (1:2.5)
Elavagnon	5.7 (0.45)	15.7 (3.1)	1.5 (0.10)	0.04 (0.02)	0.14 (0.04)	6.6 (0.05)
Dalanda	3.5 (0.14)	13.4 (1.9)	0.9 (0.08)	0.03 (0.01)	0.19 (0.10)	6.2 (0.28)

2.2. The long-term experiments

These experiments were designed to assess the long-term productivity of cotton-based systems under different nutrient and crop residue management regimes. Both experiments exhibit an initial phase of about 10 years during which the treatments differed to some extent, and a subsequent period of about 20 years during which all experimental plots were cultivated in cotton monocropping or cotton-cereal rotations under controlled conditions (Tables 2 and 3). We compiled 30 years of yield and soil analytical data available in grey literature and revisited the experimental sites to sample the soils in 2007. Data that were incomplete or unreliable for certain years, replicates or treatments were discarded.

Crop rotation experiment at Elavagnon

Four crop rotations were compared at Elavagnon between 1977 and 1986 (Table 2). Residues of all crops except for cotton were incorporated into the soil after harvest. Cotton stems were gathered after harvest and burnt on each experimental plot. Mineral fertilisers were applied at locally recommended rates (RR) for cotton and cereals. Between 1987 and 2007, continuous cotton and cotton-cereal rotations were cultivated with fertilisers at RR, and all crop residues were burnt in March-April every year. Each rotation was conducted with three replications in plots of 3000 m². Every year from 1977 to 2007, crops were harvested and weighed to determine yields. Topsoil (0-20 cm) samples were taken in 1979, 1982, 1985 and 2007 from each experimental plot, taking 10 samples along a diagonal that were then mixed to obtain one composite sample per plot.

Table 2: Experimental factors and management practices tested at Elavagnon

Cropping system	Period 1977-1986 ⁰	Period 1987-2007
Rotation A	Cotton/Late sorghum*/Maize-cowpea	Generalised cotton and cotton-cereal rotation in all experimental plots: 13 years of cotton; 5 years of maize and 1 year of cowpea
Rotation B	Groundnut-Cotton/Late sorghum/Maize-cowpea	
Rotation C	Cotton/Early sorghum*/Maize-cowpea	
Rotation D	Groundnut-Cotton/Early sorghum/Maize-cowpea	
Fertiliser regime:	Application of NPKS at rates of (kg ha ⁻¹): 53-22-25-10 for cotton and 45-7-12-0 for cereals	
Crop residue management:	Cereal and legume residues incorporated; cotton residues (stems) uprooted and burnt on a pile in March-April	Burning of all crop residues in March-April

⁰The experiment started shortly after woodland clearance *Early- and Late sorghum correspond to early or late maturing varieties that take 3 or 6 months to complete their cycle
Mineral fertiliser experiment at Dalanda

The experiment at Dalanda consisted of an initial phase during which crop responses to mineral fertilisers were tested, including locally recommended and increased application rates, and N or P omission treatments. For the purpose of this study, and because not all datasets were complete, we selected four contrasting treatments (Table 3).

Table 3: Experimental factors and management practices tested at Dalanda (RR stands for recommended rate)

Fertiliser regime	Period 1974-1980*	Period 1981-1987	Period 1988-2007
No fertiliser / RR	All crops were not fertilized	Locally recommended (RR) NPKS rates (kg ha ⁻¹): 53, 22, 25, 10 (cotton) 45, 7, 12, 0 (cereals) 0, 63, 40, 18 (groundnuts)	Generalised cotton and cotton-cereal rotation in all experimental plots: All plots receiving locally recommended (RR) NPKS rates (kg ha ⁻¹): 53, 22, 25, 10 (cotton) 45, 7, 12, 0 (cereals)
No fertiliser / 1.5 RR		Increased (1.5 RR) NPKS rates (kg ha ⁻¹): 78, 33, 37, 10 (cotton) 67, 10, 19, 0 (cereals) 0, 94, 60, 27 (groundnuts)	
Fertiliser / RR	Annual NPKS applications at rates of 1.5RR (kg ha ⁻¹): 78, 33, 37, 10 (cotton) 67, 10, 19, 0 (cereals)	Locally recommended (RR) NPKS rates (kg ha ⁻¹): 53, 22, 25, 10 (cotton) 45, 7, 12, 0 (cereals) 0, 63, 40, 18 (groundnuts)	
Fertiliser / 1.5 RR		Increased (1.5 RR) NPKS rates (kg ha ⁻¹): 78, 33, 37, 10 (cotton) 67, 10, 19, 0 (cereals) 0, 94, 60, 27 (groundnuts)	
Crop rotation:	A sequence of cotton, sorghum, maize and groundnuts		11 years of cotton, 3 years of Sorghum and 5 years of maize
Crop residue management:	Burning of all crop residues in March-April from 1974 to 2007		

*The experiment started shortly after woodland clearance

Two different fertiliser application rates were implemented: fertiliser at RR and fertiliser at recommended rate increased by 50% (1.5RR). During the initial phase (1974-80), fertilisers were applied at 1.5RR in half of the plots. Between 1981 and 1987, fertilisers were applied

either at RR or 1.5RR in all plots, including those that did not receive fertilisers in the initial phase. Between 1986 and 2007 continuous cotton and cotton-cereal rotations were cultivated in all the experimental plots, receiving fertilisers at RR; samples were taken every year to calculate and record average yields for the entire site. Each treatment was conducted with 4 replications on experimental plots of 574 m². During the three phases of the experiment, crop residues were burnt between March and April every year. Topsoil (0-20 cm) samples were taken from each plot following a similar procedure as in Elavagnon. The first soil sampling took place in 1981, and was followed by sampling in 1985, 1988 and 2007.

2.3. Soil carbon models

Three modelling approaches of increasing complexity were used: (i) the classical mono-component model of Hénin-Dupuis (1945); a modification of this by adding a stable C compartment proposed by Andriulo et al. (1999); and the reference multi-compartment model Roth-C (Jenkinson and Rayner 1977). The following is a brief description of their mechanisms and assumptions:

In the Hénin-Dupuis (HD) model, C inputs to the soil are calculated on an annual basis as K_1M , and soil C outputs through decomposition as $K_2C_{(t)}$, where M is the total amount of C in plant biomass added to the soil and $C_{(t)}$ is the amount of C presented in the soil at any time t . The proportionality K_1 is the iso-humic coefficient (or humification coefficient in later references – e.g. Yang and Janssen 2000), and depends on biomass quality, C:N ratio and lignin content. The proportionality K_2 is the annual mineralisation rate of soil C, and depends on soil properties, soil environment, and modification through agricultural practices. The stock of C at time t is calculated as:

$$C_{(t)} = \frac{K_1M}{K_2} + \left(C_0 - \frac{K_1M}{K_2} \right) \exp(-k_2t) \quad (1)$$

where, C_0 is the initial amount of soil C.

The Andriulo, Mary and Guérif (AMG) model divides soil C into two components: labile and stable. The labile pool is treated in the same way as in the HD model, whereas the stable pool is considered to decompose extremely slowly, and therefore taken as a constant. The equation then adds an asymptotic term to the exponential decline:

$$C_{(t)} = \frac{K_1M}{K_2} + C_{st} + \left(C_0 - C_{st} - \frac{K_1M}{K_2} \right) \exp(-k_2t) \quad (2)$$

where C_{st} is the amount of stable soil C, considered to be around two thirds of total initial soil C in soils of temperate regions (Mary *et al.* 1994).

The Rothamsted model (Roth-C) works on a monthly time step and divides soil C into five compartments: decomposable plant material (DPM), resistant plant material (RPM), microbial biomass (BIO), humified organic matter (HUM) and an inert C pool (IOM) that is a fraction of total soil C. The calibration of Roth-C against data from the long-term experiments of Rothamsted (UK) yielded values of 10, 0.3, 0.66 and 0.02 year⁻¹ for the annual relative decomposition rates of the pools DPM, RPM, BIO and HUM, respectively (Coleman and Jenkinson 2005). Part of the C released from decomposition is lost as CO₂, increasing with soil sand content. The remainder enters the BIO and HUM pools, in the proportions 0.46 and 0.54, respectively. The partitioning of plant biomass into DPM and RPM depends on its quality, and a ratio DPM/RPM of 1.44 is often used for cereal residues. The value of IOM is calculated as (Falloon *et al.* 1998):

$$IOM = 0.049 TOC_i^{1.139} \quad (3)$$

where TOC_i is the initial amount of total soil C.

2.4. Data collection and model parameters

The main data necessary to parameterise HD and AMG are soil C stocks and annual C inputs in the form of plant biomass. Roth-C requires also monthly averages of rainfall, temperature and evapotranspiration, soil clay content and the initial C stocks of each of the model pools. Climatic data were gathered at meteorological stations located at each site. Total C stocks (t ha⁻¹) were calculated from measured soil C concentrations and bulk densities for the first 20 cm of the soil profile. In view of the spatial variability of these two parameters, we assumed a coefficient of variation of 0.2 for the C stocks calculated (Arrouays *et al.* 1995), which were then expressed within an interval of confidence given by:

$$\bar{X} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

where, \bar{X} is the calculated soil C, σ its standard deviation, α the experimental error (0.05), n is the number of samples and $t_{(n-1, 1-\alpha/2)}$ the Student- t ratio.

The inputs of C to the soil from above- and below-ground crop biomass (AGB and BGB) were calculated from data on crop yields, C content in biomass, and information on crop residue management, using average values for the harvest index ($HI = AGB/Yield$), the

root:shoot ratio (RSR) and the root distribution factor (RDF) obtained from the literature for the various crops considered. HI of 1.4, 1.3, and 2.2; RSR of 0.13, 0.23, and 0.25 for cotton, maize and sorghum respectively were used to calculate total AGB and BGB (Gregory and Reddy 1982; Craufurd et al. 2002; Diels et al. 2004). Typical values for the coefficient of variation of HI were used to estimate a confidence interval for the calculated ABGs. RDF of 0.75, 0.66, and 0.60 for cotton, maize and sorghum respectively were used to calculate root biomass for the upper 20 cm of the soil as a fraction of total BGB (Alvey et al. 2001). The C contents were considered to be 42% for cereals and cotton residues and 20% for legumes, following Solomon et al. (2007). The C inputs from rhizo-deposition were set at 35% of BGB in the topsoil considered (Balesbent and Balabane 1992; Qian et al. 1997). Inputs of BGB from groundnuts and cotton were neglected, given the type of harvesting used for these crops.

The calculation of C inputs from AGB was based on observed crop residue management (cf. Tables 2 and 3). During the first 10 years at Elavagnon, all C in AGB was incorporated into the soil except for the dry cotton shoots, which were uprooted and burnt in situ. During the 20 subsequent years, and during the 32 years of experiment at Dalanda, all crop residues were burnt in March-April. In such cases, the following C inputs were assumed from AGB: 100% for groundnuts, 70% for maize (early harvest, allowing 6 months for decomposition), 10% for sorghum (late harvest, allowing only 3 months for decomposition during a dry period). These values were chosen because the crop residues remained in the field for some time before being burnt, under temperature and moisture conditions highly conducive to microbial activity immediately after harvest (Holland and Coleman 1987). The relationship between crop C inputs to the soil and annual rainfall throughout the 30 years of the experiment was analysed by fitting a logistic model to the observations falling on the upper boundary of the observed values, following Shatar and McBratney (2004).

2.5. Model calibration, testing and scenario analysis

Following Roussel et al. (2001), soil C measurements taken in 1979, 1982 and 2007 at Elavagnon and in 1981, 1985 and 2007 at Dalanda were used for model calibration. Those taken in 1985 at Elavagnon and in 1988 at Dalanda were used as independent measurements for model testing. The HD model was calibrated by adjusting K_1 and K_2 against measured data, using the algorithm of Levenbert-Marquardt with known M and $C_{(t)}$ (cf. Eqn. 1). The AMG model was calibrated in a similar way but also fitting C_{st} values (cf. Eqn. 2) that minimised the bias between observations and model results and that were coherent with

estimations of this parameter in comparable soil types and environments (e.g., Zingore et al. 2005). The Roth-C model was re-written as an Excel worksheet to allow the rate constants of the various pools to be modified. These parameters were fitted with an optimisation solver, by minimising root mean squared errors (RMSE), and using values for other tropical environments from the literature as reference (e.g., Diels et al. 2004; Sogbedji et al. 2006). Other indicators of model performance used to evaluate the three models were the Student-*t* test at 5%, the coefficients of determination r^2 , of model efficiency (*EF*) and the quotient of variances (*QV*):

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$QV = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

where, *O* stands for observed and *P* for predicted or simulated. The value of *EF* ranges between +/- 1, with positive values indicating good agreement between model and measurements (Berntsen et al. 2006). When *QV* > 1, the variance of simulated values is smaller than for the measurements. The sensitivity of the models to changes of +/-10% in their parameters and initialisation variables was also calculated.

The models thus parameterised and tested were used to calculate the amount of C input as plant biomass necessary to restore soil organic C under continuous cultivation, to analyse the potential for SOC restoration through increased crop C inputs. Scenarios of (extra) plant biomass dry matter additions of 0 to 7 t ha⁻¹ year⁻¹ were simulated for prospective time horizons of up to 30 years. Assuming an average C content of 42%, the application rates of C resulted thus in 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 t ha⁻¹ year⁻¹. Taking into account the climate change scenario for the region, the effect of a 1°C increase in the average monthly temperature on soil C dynamics was also simulated using Roth-C.

3. Results

3.1. Long-term changes in crop productivity and C inputs to the soil

Yields of all crops tended to decline at both sites throughout the 30 years of the experiment (Fig. 1). During the first 10 years, cotton yields at Elavagnon varied between rotation systems, but not for all seasons, and were always the largest under Rotation C (Fig. 1a). Early maturing sorghum (Rotations C and D) produced larger yields than late maturing sorghum. During the initial period (1974-1980) at Dalanda, fertiliser application at 1.5RR led to cotton, sorghum and maize yields that were on average 68, 128 and 38% larger than the control, respectively, while maize exhibited an incremental response to fertilisers over time (Fig. 1b,d,f). During the period 1981-1987, when all plots received fertilisers, there was no difference in crop response to RR vs. 1.5RR. At both sites, yields of all crops declined over the next 20 years, in spite of annual fertiliser applications, and without clear differences between plots that had been under different rotations for the previous 10 years. Residual effects of fertiliser application or crop rotation were also unnoticeable during this period.

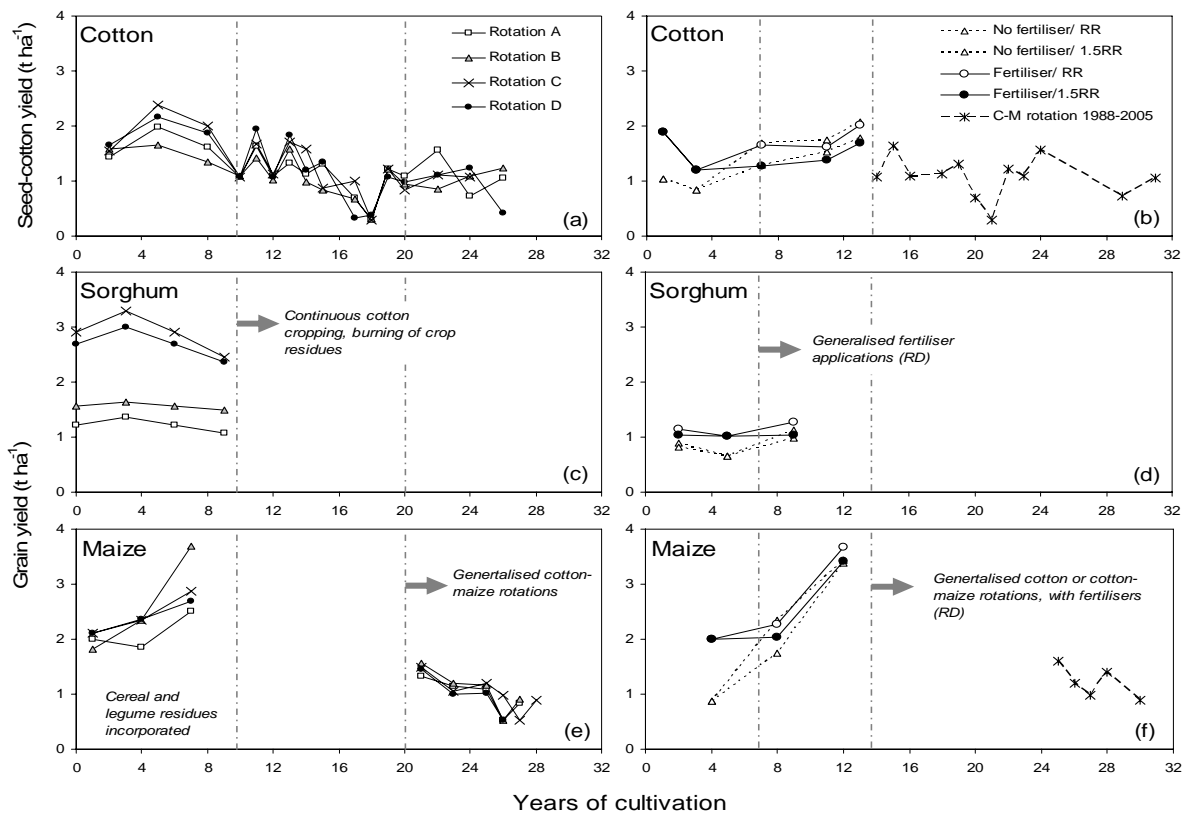


Fig. 1 Yields of seed-cotton (a and b), and grain yields of sorghum (c and d) and maize (e and f) for all treatments over the entire period of experimentation at Elavagnon (a, c, e) and Dalanda (b, d, f). Vertical dash-dotted lines separate the different phases of the experiments, as described in Tables 2 and 3.

Such levels of crop productivity plus residue management practices resulted in different magnitudes of C inputs to the soil, which were larger at Elavagnon than at Dalanda (Fig. 2a). The presence of high-yielding early maturing sorghum in Rotations C and D at Elavagnon (average C input rate of. $2.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) resulted in an increase of over 100% in cumulative C inputs compared with Rotation A. Maximum annual C inputs to the soil were in the order of 4 t ha^{-1} when rainfall was greater than c. 900 mm during the season, as indicated by the boundary line model fitted to the data from Elavagnon in Fig. 3. At Dalanda, annual burning of crop residues from the start of the experiment led to cumulative C inputs to the soil that were less than 20 t ha^{-1} over the 32 years of the experiment (less than $0.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), removing any possibility of a fertiliser effect on crop C inputs to the soil (Fig. 2b).

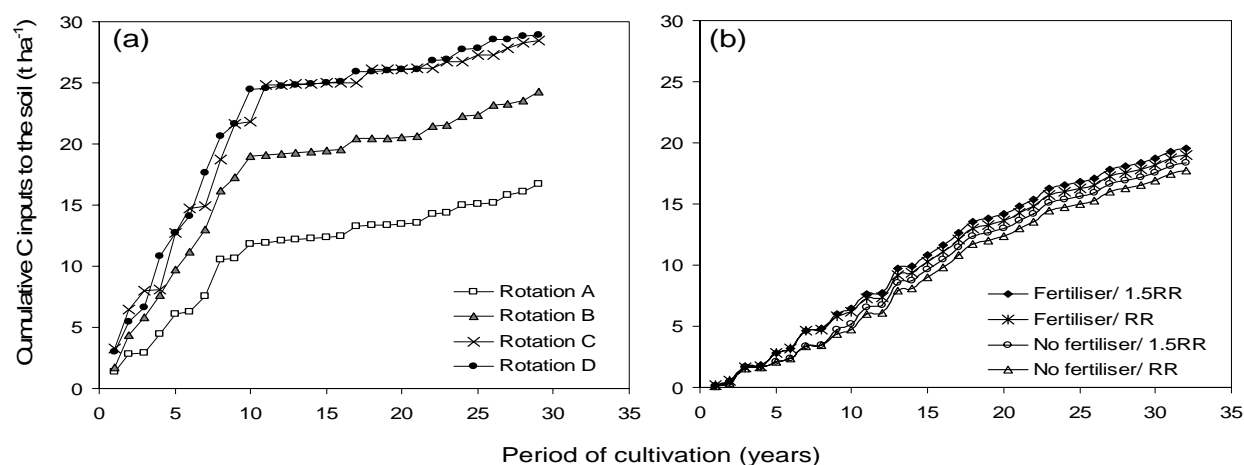


Fig. 2 Cumulative carbon inputs to the soil calculated from yield data, biomass production and crop residue management practices; (a) Rotation experiment at Elavagnon (1977-2005); (b) Fertilization experiment at Dalanda (1974-2005).

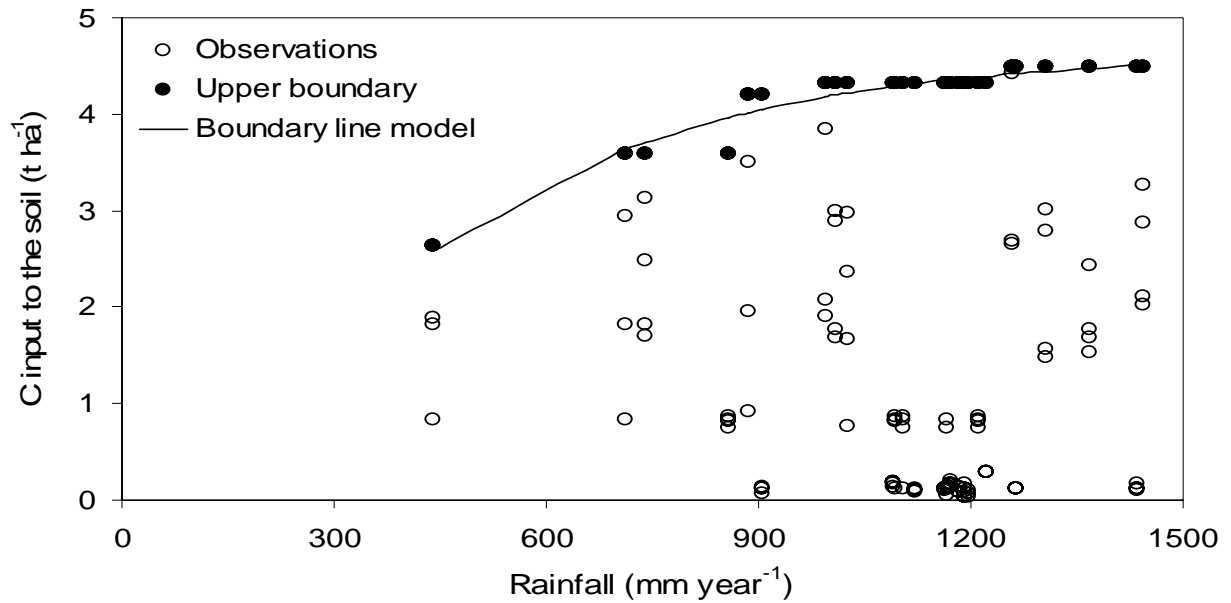


Fig. 3 The relationship between seasonal rainfall and crop C inputs to the soil calculated from biomass production data and crop residue management at Elavagnon (1977-2005). The logistic model ($Y = 4.66 - 6.51 \times 0.99^x$) was fitted to the observations falling on the upper boundary, representing the potential contribution of C to the soil via crop residues as determined by rainfall.

3.2. Soil carbon dynamics

The stocks of organic C in the upper 20 cm of the soil decreased over the 30 years of the experiments at both sites and for all treatments, with averages of 3.2 and 2.9 t ha⁻¹ for Elavagnon and Dalanda, respectively. Such a decrease was on average faster during the first five years, around 20% at Elavagnon and 14% at Dalanda (Fig. 4). On average, equilibrium was reached earlier at Elavagnon, with two cropping seasons per year, than at Dalanda (2 vs. 8% soil C lost during subsequent years). Fertiliser application at 1.5RR at Dalanda during the first six years (1974-1980) and biomass incorporated into soil at Elavagnon during the first 10 years (1977-1986) did not lead to higher soil C contents. Total C inputs to the soil over the 30-year period, which were around 15 to 30 t ha⁻¹, were not sufficient to compensate for C losses through decomposition (and eventually through erosion) in these tropical sandy soils. The long-term changes recorded in soil C stocks were well described as exponential declines, except for Rotation B at Elavagnon and Fertiliser/ RR at Dalanda, due to abnormally large values in 2007 that did not seem to be related to treatment effects.

The HD model described the observed soil C changes with an average humification coefficient K_1 of 0.23-0.24 for the biomass inputs to the soil and a relative decomposition rate of total soil C (K_2) of 0.034, equivalent to an average life time of about 30 years (Table 4A).

Simulations using HD often led to model efficiencies (EF) < 0 and to variance quotients (QV) < 1, explaining between 50 and 70% of the observed variation (Table 5). Due to the nature of the equation used (Eqn. 1), this model was not able to estimate equilibrium soil C levels following 30 years of cultivation of these sandy Alfisols. The AMG model was calibrated using a K_1 value comparable to that used for HD, and with decomposition rates of labile soil C (K_2) of 0.20 at Elavagnon and 0.15 at Dalanda (Table 4B), indicating average life times of c. 5 and 7 years (note the six-fold difference in the magnitude of K_2 compared to HD). The inclusion of this lower equilibrium term in AMG improved the description of observed long-term C dynamics compared to the HD model (Fig. 4). The value of stable soil C (C_{st}) that led to the best description of soil C changes corresponded to 60 to 70% of total initial soil C at both sites and differed by about 20% between Elavagnon and Dalanda. Simulations using the AMG model explained around 80% of the observed variation in soil C at both sites, and model EF, QV and RMSE improved compared to HD (Table 5).

The initialisation parameters that led to the best description of soil C changes with the Roth-C model at Elavagnon were as follows: 0.5, 14.5, 5.9, 70.8 and 8.3% of total soil C in 1979 for the pools of decomposable (DPM), resistant (RPM) plant material, microbial biomass (BIO), humified (HUM) and inert organic matter (IOM) (Table 4C).

Table 4: Model parameters obtained through calibration against observed soil C changes over 30 years (standard deviations between treatments)

Site	A) Hénin-Dupuis model			B) Andriulo, Mary, Guérin model				
	C ₀ (t C ha ⁻¹)	K ₂ (yr ⁻¹)	K ₁ (-)	C ₀ (t C ha ⁻¹)	C _{st} (t C ha ⁻¹)	K ₂ (yr ⁻¹)	K ₁ (-)	
Elavagnon	15.7 ±0.9	0.034	0.24	15.7 ±0.9	10.3 ±0.8	0.20	0.25	
Dalanda	13.4 ±0.3	0.034	0.23	13.4 ±0.3	8.3 ±0.5	0.15	0.25	
C) Rothamsted model*								
	DPM	RPM	BIO	HUM	IOM	k _{RPM}	k _{BIO}	k _{HUM}
Elavagnon	0.08 ±0.03	2.3 ±1.0	0.9 ±0.8	11.1 ±1.4	1.3 ±0.3	0.27 ±0.02	0.47 ±0.13	0.015±0.0
Dalanda	0.09 ±0.02	1.8 ±0.5	0.6 ±0.1	10.1 ±0.4	1.1 ±0.0	0.28 ±0.02	0.47 ±0.13	0.015±0.0

*Initial state (t C ha⁻¹) and decay rates (yr⁻¹) of the model C pools

At Dalanda, these proportions were, respectively: 0.7, 13.1, 4.2, 74.5 and 7.5% of the total soil C stock in 1981 (after seven years of cultivation). The value of the decomposition rates of the various pools was similar at both sites, with corresponding mean life times of 0.1, 4.0, 2.0 and 67.0 years for DPM, RPM, BIO and HUM. The simulations using Roth-C explained 80% of the observed variation in soil C, and the RMSEs were around 5% of initial soil C levels,

but model EF and QV did not improve compared to AMG (Table 5). Equilibrium soil C was not reached within the 30 years of cultivation simulated (Fig. 4).

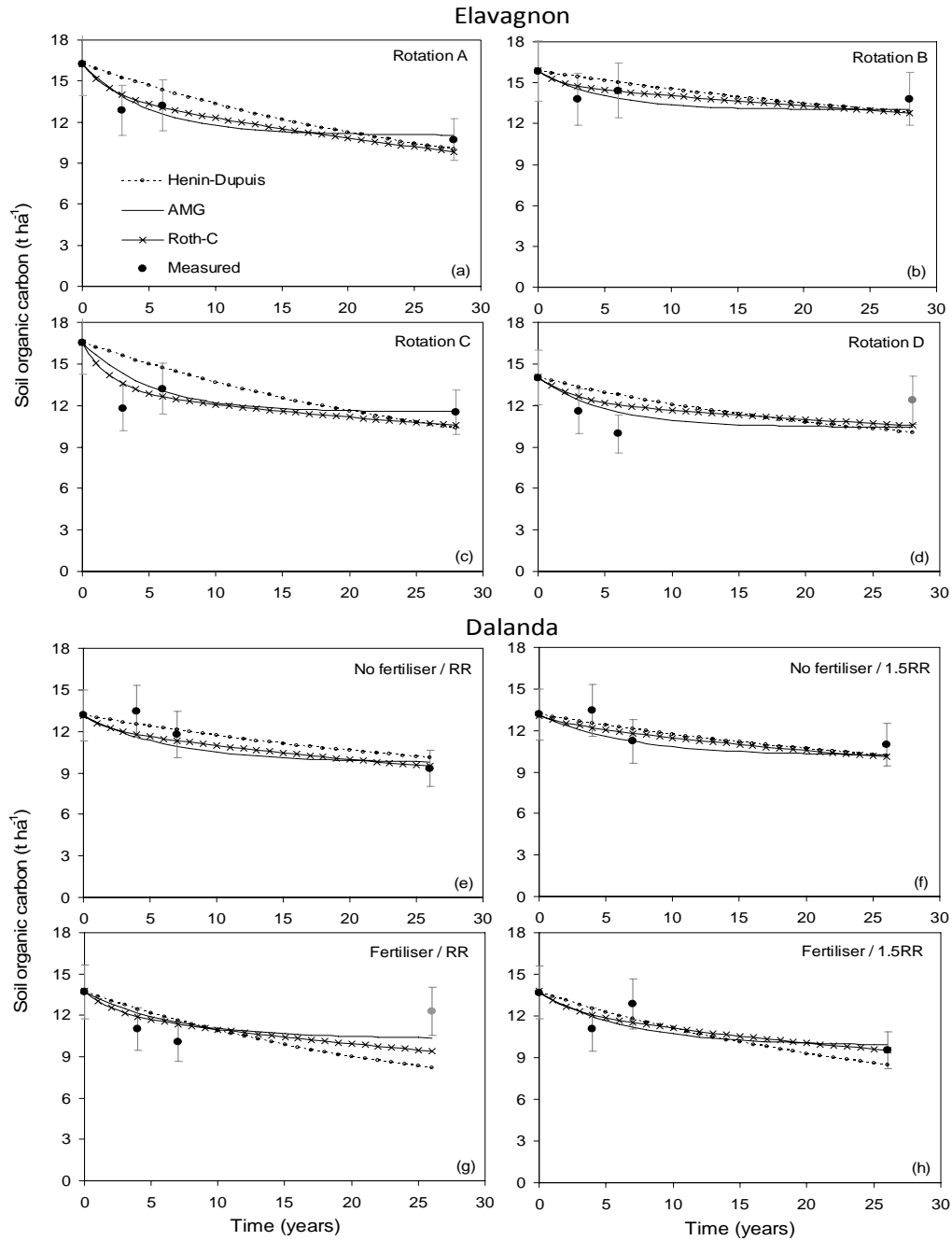


Fig. 4 Observed and simulated long term changes in soil C stocks at Elavagnon and Dalanda under the various rotation and fertilizer treatments evaluated. Vertical bars across individual markers indicate their standard deviation.

Table 5: Statistic ratios indicated a quality of adjustment between models soil C simulated and measured

Site	Hénin-Dupuis model			AMG model			Rothamsted model		
	EF > 0 et QV > 1	R ²	NRMSE	EF > 0 et QV > 1	R ²	NRMSE	EF > 0 et QV > 1	R ²	NRMSE
Elavagnon	None	0.53	0.13	2 cases in 4	0.84	0.07	1 case in 4	0.80	0.08
Dalanda	2 cases in 4	0.69	0.08	4 cases in 4	0.78	0.07	2 cases in 4	0.79	0.07
Models testing with 1985 and 1988 carbon stock	$t_{cal} = 1.6 < t(4, 5\%) = 2.8$; ns			$t_{cal} = 1.5 < t(4, 5\%) = 2.8$; ns			$t_{cal} = 1.3 < t(4, 5\%) = 2.8$; ns		

Table 6: Sensitivity of the three models calibrated for Elavagnon and Dalanda to 10% changes in their parameter values; sensitivities were calculated for simulation runs of 30 years

(A)														
Site	Hénin-Dupuis model parameters						AMG model parameters							
	C ₀		K ₁ or M		K ₂		C ₀		C _{st}		K ₁ or M		K ₂	
	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%
Elavagnon	-5.8	5.8	-4.2	4.2	8.0	-5.0	0.0	0.0	-8.7	8.7	-1.2	1.2	1.3	-1.2
Dalanda	-5.3	5.3	-4.7	4.7	8.0	-5.0	-0.4	0.4	-7.8	7.8	-1.8	1.8	2.5	-2.0
(B)														
Site	Rothamsted model parameters and environmental variables													
	C ₀		HUM+ IOM		DPM/RPM		k _{HUM}		Rainfall		Temperature		ETP	
	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%
Elavagnon	-7.1	6.7	-6.5	6.5	0.7	-0.4	5.0	-4.1	4.3	-1.9	7.4	-6.6	-2.2	3.5
Dalanda	-6.7	6.9	-6.4	6.7	0.7	-0.4	5.2	-4.1	6.0	-0.1	7.5	-6.6	-0.1	5.4

3.3. Model sensitivities and scenario exploration

Model sensitivity to key parameters gives an indication of the robustness of the results obtained with the model; it can also provide an idea of the range of variation that may be expected in the processes being simulated. The sensitivity of the HD model to 10% changes in C_0 , in K_1 or M , and in K_2 was substantial (Table 6). Error in the determination of any of these parameters – some of which are difficult to estimate – will lead to relative variation of 0.5 to 0.8 in the model outcome, making it less useful as a prospective, explorative analytical tool. The AMG model was mostly sensitive to the value of C_{st} , with partial relative sensitivities of 0.8 to 0.9, and fairly robust as regards C_0 . This implies that model usability in any given environment depends largely on satisfactory determinations of C_{st} . The Roth-C model exhibited partial relative sensitivities of 0.6 to 0.7 for C_0 and for its partitioning between HUM and IOM, and of 0.5 for changes in the decomposition rate of HUM. Roth-C, under the current parameterisation, was less sensitive to plant quality parameters DPM and RPM, but highly responsive to the environmental variables rainfall and temperature. Sensitivity of model outputs to initial soil C is undesirable, since the natural variation of organic C in the soil, even within individual plots, is often around 20% (cf. Table 1).

The AMG and Roth-C models, with parameter values estimated through calibration (cf. Table 4) were used to explore long-term scenarios of organic matter restitution to the soil and of climatic variation. Addition of organic materials such as animal manure were not considered due to lack of reliable K_1 value estimates for these materials. In the dataset, the evolution of crop yields under different regimes of mineral fertiliser applications indicates substantial crop responses to this practice, on average, during the first 5-7 years of cultivation. Such responses are coherent with soil C contents that represent approximately 40% of the difference between the initial and the lower equilibrium soil C stocks. For example, at Elavagnon, this value corresponds to around $11.7 + (15.7 - 11.7) \times 0.4 = 13.3 \text{ t C ha}^{-1}$. We assumed this to be a threshold soil C stock necessary to ensure soil quality attributes that lead to acceptable crop responses in the presence of mineral fertilisers. We calculated the number of years necessary to rebuild this soil C stock with annual crop residue additions of up to $7 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (equivalent of 0 to $3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), the number of years after which soil C may reach a new equilibrium, and the associated C losses as CO_2 .

The exploration of these scenarios using the AMG model indicates that carbon additions of 0.5 to $3.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, from the 31st year of cultivation, lead to soil C stocks increases of around 0.4 to 1.6% per year (Table 7). The threshold C stock of 13.3 t ha^{-1} at Elavagnon may

be reached in 8 years with annual applications of 1.5 t C ha^{-1} , in 5 years with 2 t C ha^{-1} , and in 3 years with 2.5 t C ha^{-1} . At Dalanda, where soil measurements started after 7 years of cultivation, and presumably once the response threshold soil C was reached, we chose the soil C threshold of 13.4 t ha^{-1} , which is equivalent to the average soil C stock measured in 1981. This threshold is nevertheless only reached with applications of more than $2.5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Table 7), which lead in turn to a new equilibrium C stock of 14 t ha^{-1} after 20 years.

Table 7: Exploration of scenarios of threshold soil C* restoration with annual applications of increasing rates of plant materials

Organic matter application rate ($\text{t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)	Nr of years to reach response threshold soil C	Equilibrium soil C (t ha^{-1})	Nr of years to equilibrium	Soil C 'accumulation' rate ($\text{t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)**	Average CO_2 released ($\text{t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)
<i>Elavagnon</i>					
0	NR	11.8	-	-	1.3
0.5	NR	12.4	10	0.06	1.7
1.0	NR	13.0	12	0.10	2.1
1.5	8	13.7	20	0.10	2.5
2.0	5	14.3	19	0.14	3.0
2.5	3	14.9	17	0.18	3.5
3.0	3	15.5	17	0.22	3.9
<i>Dalanda</i>					
0	NR	10.0	-	-	1.1
0.5	NR	10.8	17	0.05	1.5
1.0	NR	11.6	18	0.09	2.0
1.5	NR	12.4	18	0.13	2.4
2.0	NR	13.3	26	0.13	2.9
2.5	11	14.1	25	0.16	3.4
3.0	7	14.9	24	0.20	3.8

* 13.3 and 13.4 t C ha^{-1} at Elavagnon and Dalanda respectively; **Calculated as the difference between equilibrium C stocks when organic matter was and not applied; NR: not reached

The rate of soil C accumulation, averaged during the period up to new equilibrium, ranged at both sites from 0.06 to $0.22 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Table 7). Application of $1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ leads to soil C formation rates of 0.09 to $0.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, equivalent to net humification rates of 9-10%; application of $3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ leads to 7-8% humification. These values are in line with the relatively large losses of C as CO_2 that were calculated. The same explorations using Roth-C yielded similar rates of increase in soil C stocks, and C loss as CO_2 , but equilibrium stocks were much larger (e.g., up to 18 t C ha^{-1} after 30 years of application of $3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$). Using Roth-C, an increase in average monthly temperatures of 1°C reduced equilibrium soil C levels without organic matter additions by 27%, which translated into an

extra 3.2 and 2.7 t ha⁻¹ of CO₂-C released to the atmosphere, at Elavagnon and Dalanda, respectively. In all these simulations we maintained primary productivity, and therefore C inputs from biomass produced *in situ*, at a constant level equal to the average biomass productivity recorded in the experiments. In reality, crop primary productivity is expected to increase as soil C is restored, thus leading to larger C inputs to the soil and presumably to faster restoration rates. We chose to keep crop biomass production constant due to lack of reliable relationships between soil C and crop yields that could be used to estimate the latter.

4. Discussion

Vegetation clearance and continuous cultivation lead to a rapid decline in the soil stocks of C in these savannah-derived agroecosystems of semiarid Togo, and to an associated decline in primary productivity even when fertilisers were applied annually (cf. Fig. 1, 4). In all treatments evaluated in the long-term experiments examined here the rate of decomposition of applied and soil organic matter was faster than the rate of soil C accumulation, leading to net C losses (Fig. 4). C stocks in these sandy Alfisols, with a limited capacity to protect organic matter through organo-mineral binding, and under torrid temperature regimes, are generally small even under the natural savannah vegetation. Replacement of the natural vegetation with annual crops that provide more easily decomposable C inputs, and soil disturbance through tillage result in positive feedback loops in terms of C losses that are difficult to break. Poor crop productivity, as a result of soil fertility decline, does not provide sufficient biomass inputs to compensate for soil C losses, nor to ensure adequate soil cover to prevent soil erosion in these climates (e.g. Roose and Barthes 2001), further accelerating the process of C loss.

Burning, grazing or exportation of crop residues from cultivated fields and lack of fertiliser use are often put forward as major management factors determining the negative C and nutrient balances that lead to soil fertility decline in West Africa (e.g., de Ridder et al. 2004; Bationo et al. 2006). The incorporation of crop residues in the soil during the first 10 years of the experiment at Elavagnon, however, did not prevent the decline in soil C and crop productivity registered during this period (Fig. 2). On the other hand, burning of crop residues in March/April reduces organic C inputs to the soil to a variable degree depending on crop type. Early maturing crops and crop varieties provide residue biomass during a period of the year in which the environmental conditions are conducive to decomposition, and thus the fraction of their total that is actually burnt in March/April is relatively small.

All these results question the generalised assumption that soil organic matter could be restored through extra crop C inputs resulting from an increased primary productivity associated with mineral fertiliser use – as it is currently promoted in sub-Saharan Africa (cf., www.agra-alliance.org). Differences in C stocks between treatments (fertiliser, rotations and residue management) during the first 10 years of the experiments were not substantial and often masked by the initial variability of C stocks. A hypothesis that may be put forward to explain the poor responses of crops to fertilisers as soil C decreased is the poor retention capacity or ‘leakiness’ of these soils with regard to applied nutrients (Giller et al. 2002). This hypothesis may be partly supported by the fact that early maturing varieties tended to make a more efficient use of applied fertilisers, by completing their cycle earlier in the rainy season (cf. Fig. 1).

The virtual lack of differences in the long term dynamics of soil C between sites and experimental treatments was also evident in the value of the model parameters (cf. Table 4). While the AMG and Roth-C models described the observed changes in soil C satisfactorily, the exponential decline of Hénin-Dupuis overestimated C stocks in the short-term and underestimated them in the long-term, as noted earlier (Plenet et al. 1993). This is due to the absence of a term representing stable C in the model, which is necessary to simulate C dynamics in tropical sandy soils that reach equilibrium in such a short period of time. The values of parameter K_2 obtained for the AMG model were within the range of decomposition rates of labile C pools used in other studies in the region (Bostick et al. 2006). Although double cropping every year may have contributed to faster decomposition rates at Elavagnon, the differences in the value of K_2 with respect to Dalanda (0.20 vs. 0.15) may be attributed to the lack of soil C measurements during the initial phase of fast decomposition at this site; soil C stocks decreased in both cases in about 3 t ha^{-1} over the 30 year period. Likewise, the difference in the value of C_{st} between sites cannot be attributed to differences in soil texture (i.e., in the amount of stable soil C that can be stored in the soil – Six et al. 2002) (cf. Table 1), nor to differences in the biomass and composition of the original vegetation, which might have led to different amounts of charcoal C in the soil following savannah clearance (Titttonell et al. 2007). The fraction of C_{st} obtained here was around the suggested 2/3 of total initial C proposed by Mary and Guérif (1994) from studies in temperate regions.

The formalisms of the Roth-C model did not allow the simulation of equilibrium soil C stocks reached within 30 years of cultivation, due to the calculation of IOM as a constant fraction of total soil C (Eqn. 3). This limitation of the Roth-C model to describe fast changes in soil C

following vegetation clearance in tropical environments has been recently pointed out by Gotschalk et al. (2010). In our simulations, the fraction of IOM that led to the best description of soil C changes was larger than that calculated through Eqn. 3 in standard Roth-C, and the sum of the pools IOM and HUM was about that of parameter C_{st} in the AMG model. To arrive at this, the values of k_{RPM} , k_{BIO} and k_{HUM} were also set at slower rates as default parameters in standard Roth-C; but the value of the parameter that indicates the effect of temperature on soil C decomposition (calculated using the standard equation in Roth-C) was larger in these tropical sandy soils. This is an artefact of the calibration of Roth-C that is not consistent with the fact that soil C decomposition rates are much faster in the tropics.

Traoré et al. (2008) simplified Roth-C to address the question of C sequestration in tropical soils, reducing the number of compartments to two and increasing the time step to a year, and thus adopting a similar formulation to that of AMG. The advantages of using a multi-compartment model rather than a simple two-pool model, as discussed earlier (Andrén et al. 2004), were not evident from the results of the present study (Fig. 4, Tables 5, 6 and 7). In his review of models built on increasing compartmentalisation of soil organic matter, Van Keulen (2001) concluded that since rates of transformation are much faster in the tropics, small inaccuracies in the determinants of these rates may have very strong effects on the results. On the other hand, the validity of simple models that need site specific calibration of only a few parameters may be questioned when they are used in data scarce environments for which they have not been calibrated.

Our exploration of scenarios of organic matter restitution indicate that large amounts of plant material from external sources should be applied to increase soil C to threshold levels compatible with positive crop response to mineral fertilisers (Table 7). The simulations indicate annual soil C increases of 0.5 to 1.6% per year with the application of 0.5 to 3 t C ha⁻¹year⁻¹, which are comparable with the results measured earlier in long-term experiments in Burkina Faso and Senegal (Pichot et al. 1981; Pieri 1989). The apparent humification factor of applied organic matter in these soils was around 10% (cf. Table 7), and thus these amendments would also imply larger amounts of CO₂-C released to the atmosphere. To restore soil C stocks to threshold levels (c. 13 t C ha⁻¹) in one hectare of land, farmers would need to apply for 15-20 years the equivalent to the amount of crop residues that could be gathered in about 5 ha of land. These amounts are unrealistic, and they are impossible for smallholder farmers who generally have a limited labour force available. The threshold values proposed in our calculations were arbitrary, since it is almost impossible to

obtain quantitative estimates of desirable and threshold values for soil organic matter levels in West Africa, as Pieri (1989) warned long ago. Although not contemplated in this study, reduced soil disturbance through minimum or no tillage could be one alternative that, together with proper fertiliser and crop residue management may contribute to slower down soil C losses associated with cultivation of sandy soils in savannah-derived agroecosystems.

II. Compartiment de C du sol résistant à l'hydrolyse acide et vitesse de minéralisation de C du sol évaluée par incubation

2.1. Importance relative des fractions de sol et quantité résistante de C

La fraction de terre fine dans les échantillons de sol à Elavagnon est plus faible et assez hétérogène contrairement à celle des échantillons de sol à Dalanda (Table 8). Elle représente 66 à 90% du sol total à Elavagnon contre 97 à 98% à Dalanda. La fraction de sol inférieure à 50 μm ($F < 50 \mu\text{m}$) est très faible dans les sols des deux sites à cause de leurs taux d'argile qui ne sont que 3 à 5%. La fraction inférieure à 50 μm ne représente que 10 à 12% de la terre fine à Elavagnon et 9 à 10% à Dalanda.

Table 8 : Fractions de la terre fine et teneurs en C et N (Elavagnon et Dalanda)

Fraction de sol*	Elavagnon				Dalanda			
	Rotation A	Rotation B	Rotation C	Rotation D	No fertiliser/ RR	No fertiliser/ 1.5RR	Fertiliser/ RR	Fertiliser/ 1.5RR
Terre fine (< 2 mm)								
Proportion (%)	68	90	66	75	97	97	98	98
C (g kg ⁻¹)	4,7	4,8	4,8	6,4	3,4	4,0	4,5	3,5
N (g kg ⁻¹)	0,28	0,34	0,31	0,43	0,21	0,26	0,27	0,21
C/N	16,8	14,1	15,5	14,9	16,2	15,4	16,7	16,7
Fraction < 50 μm								
Proportion	10	12	11	12	9	9	10	10
C (g kg ⁻¹)	28,5	25,9	24,8	28,8	21,9	26,3	24,4	24,7
N (g kg ⁻¹)	1,9	1,7	1,5	1,9	1,3	1,6	1,4	1,5
C/N	15,0	15,2	16,5	15,2	16,8	16,4	17,4	16,5

**La fraction de terre comprise entre 50 μm et 2 mm a été pesée (87 à 88% de terre fine à Elavagnon et 88 à 90% à Dalanda) mais ses concentrations en C et N n'ont pas été déterminées. Les quantités de C et N dans cette fraction ont été déduites par différence entre les quantités dans la terre fine et dans la fraction < 50 μm .*

Bien que la proportion de $F < 50 \mu\text{m}$ est très faible, elle contient une grande partie de C du sol. La quantité de C associé à $F < 50 \mu\text{m}$ représente 60 à 71% de C total du sol à Elavagnon et 62 à 75% de celui-ci à Dalanda (Fig. 5a). Elle est fortement associée aux taux d'argile + limon

fin (Fig. 5b). A Elavagnon où les taux d'argile sont légèrement plus élevés qu'à Dalanda, la quantité de C associée à $F < 50 \mu\text{m}$ est également élevée.

Les concentrations de C et N dans la fraction $< 50 \mu\text{m}$ sont dans un rapport C/N de 15-16 à Elavagnon et de 16-17 à Dalanda (Table 8). Tel que observé par Paul et *al.* (2008), le rapport C/N dans $F < 50 \mu\text{m}$ n'est que très légèrement plus élevé que celui de la terre fine. Ce niveau peu différent des rapports C/N traduit la présence éventuelle de C résistant dans la fraction de sol supérieure à $50 \mu\text{m}$ et s'expliquerait par (i) la dispersion des particules fines qui n'aurait pas été totale et/ou (ii) l'enrobage de C entre les grains de quartz qui sont difficiles à disperser.

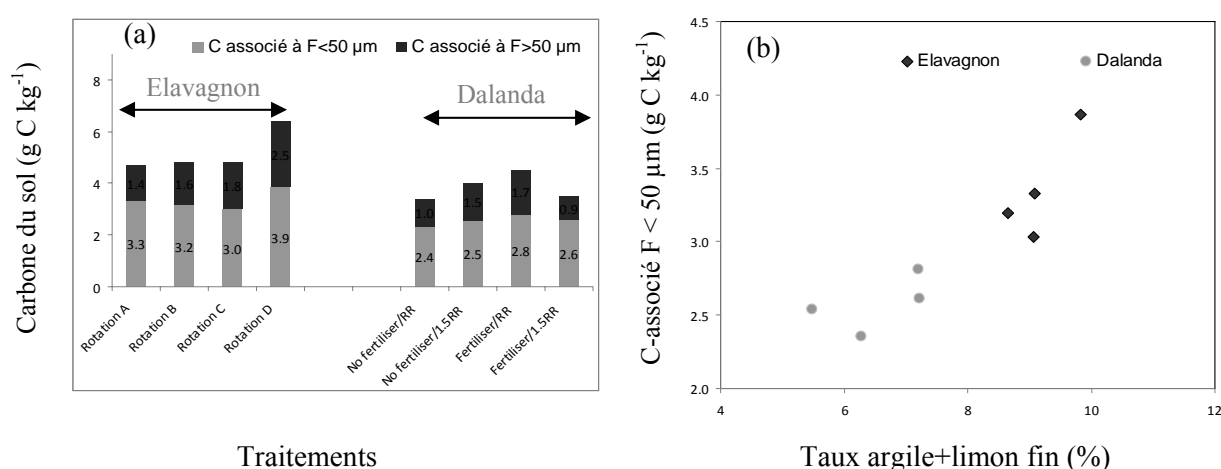


Figure 5 : importance relative de C total dans les fractions de la terre fine (a) et relation entre C-associé à la fraction $< 50 \mu\text{m}$ et le taux d'argile + limon (b).

La proportion de C associé à $F < 50 \mu\text{m}$ et ayant résisté à l'hydrolyse HCl varie entre 56 et 64% à Elavagnon, entre 57 et 61% à Dalanda et les résultats sont très reproductibles (Ecart type $< 0,03$) (Fig. 6a). Le carbone perdu sous forme de CO_2 lors du chauffage-acide représente 3 % ($\pm 0,06$) de C dans $F < 50 \mu\text{m}$. Les fractions de C résistant à l'hydrolyse HCl obtenues dans la présente étude sont comparables à celles rapportées pour des sols aux taux d'argiles similaires (Trumbore et *al.*, 1996 ; Leavitt et *al.*, 1996 ; Paul et *al.*, 1997). Par rapport à l'échantillon de sol initial, le rapport C/N dans l'hydrolysats¹⁷ a fortement augmenté et varie entre 112 et 180 à Elavagnon et entre 164 à 190 à Dalanda, indiquant l'hydrolyse quasi-totale de N. L'augmentation du rapport C/N de 8 dans la terre fine à 80 dans l'hydrolysats a été rapportée par Paul et *al.* (2008) et avait été expliquée par la réaction

¹⁷ Culot de sol après hydrolyse

d'hydrolyse qui est sélective vis-à-vis des liaisons C-N de la chaîne moléculaire (Plante *et al.*, 2006 ; Helfrich *et al.*, 2007). Les valeurs obtenues ici sont toutefois plus élevées que celles rapportées par ces auteurs et trouveraient deux autres raisons. Les conditions d'hydrolyse utilisées ici sont plus intenses (chauffage à 105°C pendant 18 h contre 95°C pendant 16 h). La proportion de N minéral sous forme de nitrate qui serait élevée dans ces sols (hypothèse non testée) induirait d'autre part le lessivage de N lors de l'hydrolyse.

La quantité de C associé à $F < 50 \mu\text{m}$ et qui a résisté à l'hydrolyse HCl représente en moyenne 40 % du stock de C total ($F < 50 \mu\text{m} + F > 50 \mu\text{m}$) observé en 2007 sur les deux sites (Fig. 6b).

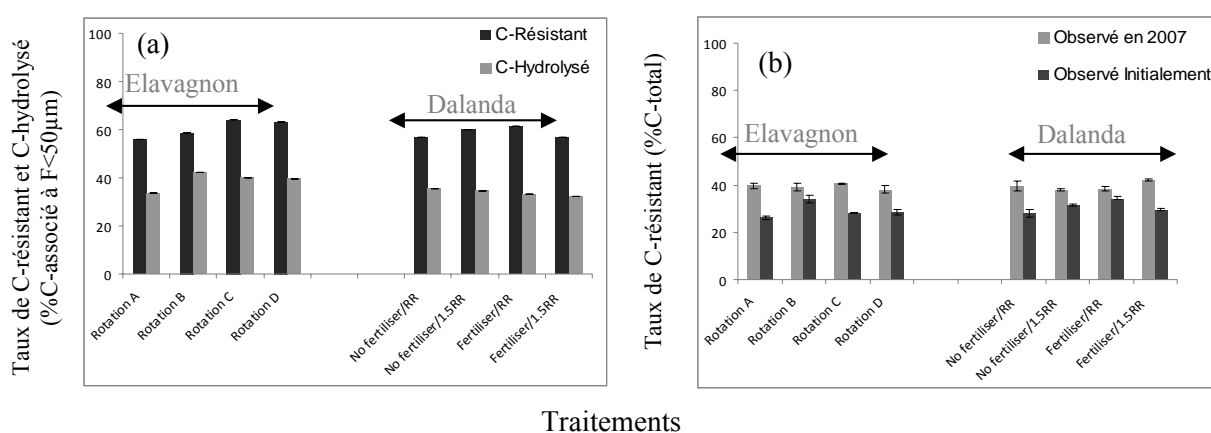


Figure 6 : Proportion de C-résistant et C-hydrolysé dans C-associé à la fraction de sol $< 50 \mu\text{m}$ (a) puis comparaison de C-résistant à C-total à différents âges de culture (b).

En admettant que cette quantité de C résistant a été constante dans le temps, elle représenterait environ 30 % du stock total de C observé en 1979 à Elavagnon et en 1981 à Dalanda. Le stock résistant de C ainsi mis en évidence conforte la faible performance à simuler l'évolution du stock C de ces sols avec le modèle HD, qui considère tout le C du sol labile (cf. article). La proportion de C résistant à l'hydrolyse HCl est plus faible que la fraction de C stable (60-67% du stock initial de C) ayant permis de décrire l'évolution observée du stock de C avec le modèle AMG et est plus élevée que la fraction inerte de C (environ 7%) dans le cas du modèle RothC. Dans des conditions pédoclimatiques ambiantes, il serait toutefois peu probable que les microorganismes du sol dégradent le C ayant résisté à une telle hydrolyse jusqu'à approcher 7% du stock initial, tel que supposé avec le modèle Roth C. D'autre part, avec le rapport C/N peu différent dans les deux fractions de terre fine (Table 8), la présence de C résistant dans la fraction sable + agrégats stables (non hydrolysée) est possible.

2.2. Conditions initiales de la parcelle expérimentale de Kolokopé à la défriche

2.2.1. Hétérogénéité spatiale de la parcelle et difficultés relatives à l'utilisation de données synchroniques de sol

Les teneurs du sol en C sont assez variables sur chacune des deux profondeurs observées. Elles varient entre 13,3 et 26,1 g C kg⁻¹, avec un CV de 14,5%, dans les cinq premiers cm du sol et entre 11,2 et 21,5 g C kg⁻¹ (CV = 16,0%) dans la profondeur 10-15 cm. Les zones plus riches en C dans la profondeur 0-5 cm en sont également plus riches dans la profondeur 10-15 cm (Fig. 7). Le coefficient de corrélation (r) entre les concentrations de C des deux profondeurs a été de 0,72.

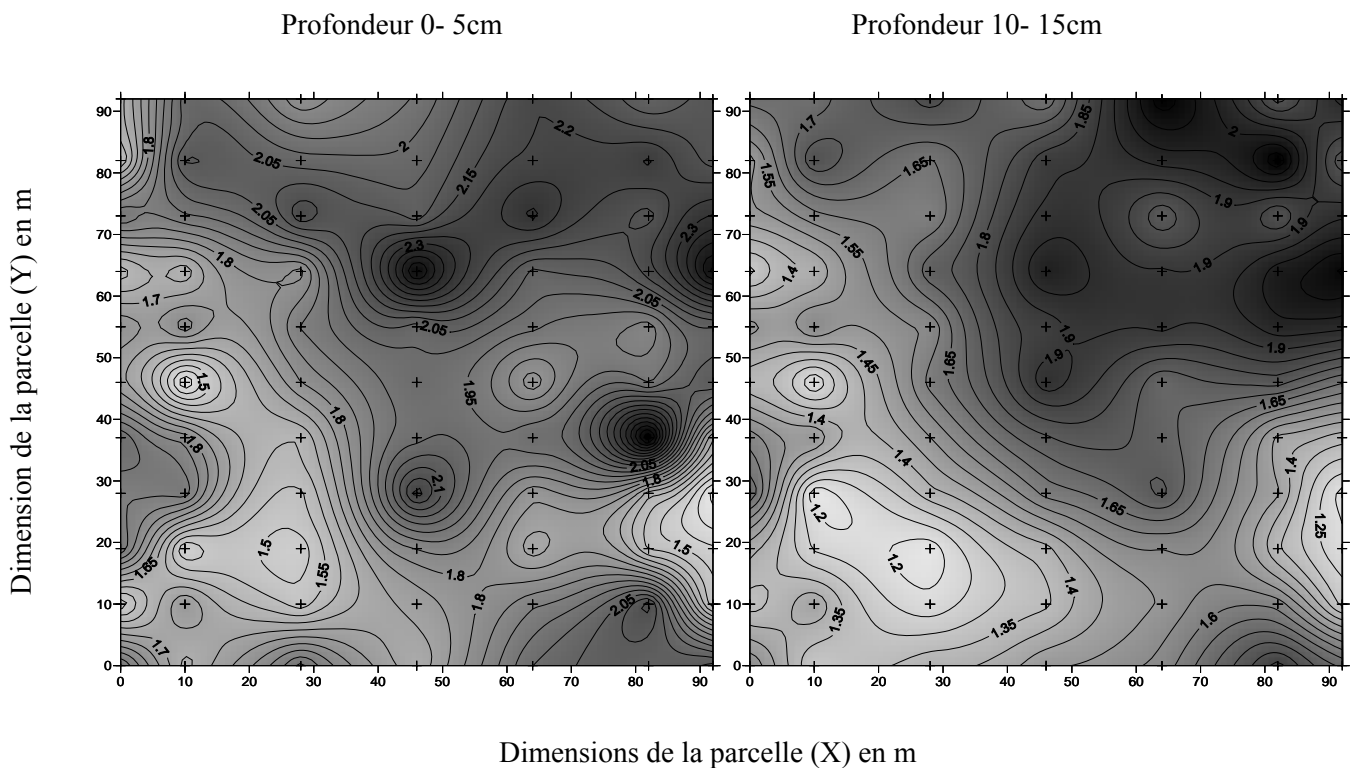


Figure 7 : Répartition spatiale des concentrations de C sur la parcelle expérimentale de Kolokopé. Les points les plus noirs étant ceux qui sont plus riches en C.

Comme les teneurs de C, la composition isotopique de C de la parcelle est aussi variable et révèle un mélange de C provenant des plantes à photosynthèse de types C₃ (ligneux et une minorité des graminées tropicales) et C₄ (graminées essentiellement). Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ varient de -20,68 à -15,24‰ dans la profondeur 0-5 cm et entre -19,20 et -14,56‰ dans la profondeur 10-15 cm. Les zones qui ont de faibles teneurs de C ont pour la plupart des valeurs isotopiques élevées ($r = -0,48$) et sont donc plus riches en isotope C₄. Wilding et *al.* (1983) et

Arrouays et *al.* (1995) ont rapporté la variabilité spatiale de C du sol avec un CV moyen de 20% et ont noté qu'elle est plus marquée sur une parcelle en culture que sur la jachère à cause de la répartition des résidus de récolte qui n'est jamais homogène. Cette variabilité spatiale de C questionne d'une part la représentabilité des échantillons de sol et d'autre part la reproductibilité¹⁸ des prélèvements synchroniques d'échantillons de sol effectués dans le cas des dispositifs de longue durée. Ces observations soulignent la nécessité de mieux suivre l'évolution du stock de C du sol à travers des points repérés d'échantillonnage de sol.

2.2.2. Vitesse de minéralisation de C et implications sur les résultats de la modélisation

La vitesse de minéralisation de C du sol a été fonction de sa composition isotopique (Table 9). Bien que par profondeur l'échantillon le plus riche en C₄ (PRC₄) a la plus faible quantité initiale de C total, la quantité de C minéralisé a été la plus élevée ; contredisant ainsi l'acceptation selon laquelle la quantité de C minéralisé augmente avec sa quantité totale.

Table 9 : Capacité au champ (CAPAC), quantités initiale (Q_i) et minéralisée (Q_m) de C lors de l'incubation (Kolokopé)

Profondeur	CAPAC (%)	Echantillons composites de sol					
		PRC ₄		MRC ₄		FRC ₄	
		Q _i (mg)	Q _m (mg C-CO ₂)	Q _i (mg)	Q _m (mg C-CO ₂)	Q _i (mg)	Q _m (mg C-CO ₂)
0-5 cm	32 ± 1,5	700	31,4 ± 1,5	792	23,5 ± 2,9	820	26,3 ± 1,4
10-15 cm	33 ± 2,9	572	20,2 ± 0,8	676	14,9 ± 0,6	708	17,6 ± 0,5

PRC₄ = Plus Riche en C₄ (-15,91 et -15,31‰ pour 0-5 et 10-15 cm respectivement) ; MRC₄ = Moyennement Riche en C₄ (-17,42 et -16,40‰) ; FRC₄ = Faiblement Riche en C₄ (-19,69 et -18,10‰). Q_i = quantité initiale de C dans 40 g de sol sec, Q_m = quantité totale de C minéralisé pendant 52 jours d'incubation.

Dans la profondeur 0-5 cm, la quantité de C minéralisé pendant les 52 jours d'incubation a été de 31,4 mg C-CO₂ pour l'échantillon de sol le plus riche en C₄ et représente près de 5% de sa quantité initiale de C total (Fig. 8a). Elle est plus élevée que les quantités de 23 et 26 mg C-CO₂ minéralisées pour les échantillons moins riches en C₄ de la même profondeur. Les quantités de C minéralisé pour ces deux échantillons moins riches en C₄ sont peu

¹⁸ Puisque des prélèvements ont été effectués à différentes périodes

différentes¹⁹ entre elles et ne représentent en moyenne que 3% de leurs quantités initiales de C total. Malgré la quantité initiale de C totale de l'échantillon le plus riche en C₄ de la profondeur 10-15 cm qui n'est que de 570 mg C, la quantité de C minéralisé durant les 52 jours d'incubation a été de 20 mg C-CO₂ et est comparable à celle minéralisé pour les échantillons moins riches en C₄ de la profondeur 0-5 cm (Table 9). Les quantités de C minéralisé pour les échantillons les moins riches en C₄ de la profondeur 10-15 cm ont été les plus faibles, 15 et 17 mg C-CO₂.

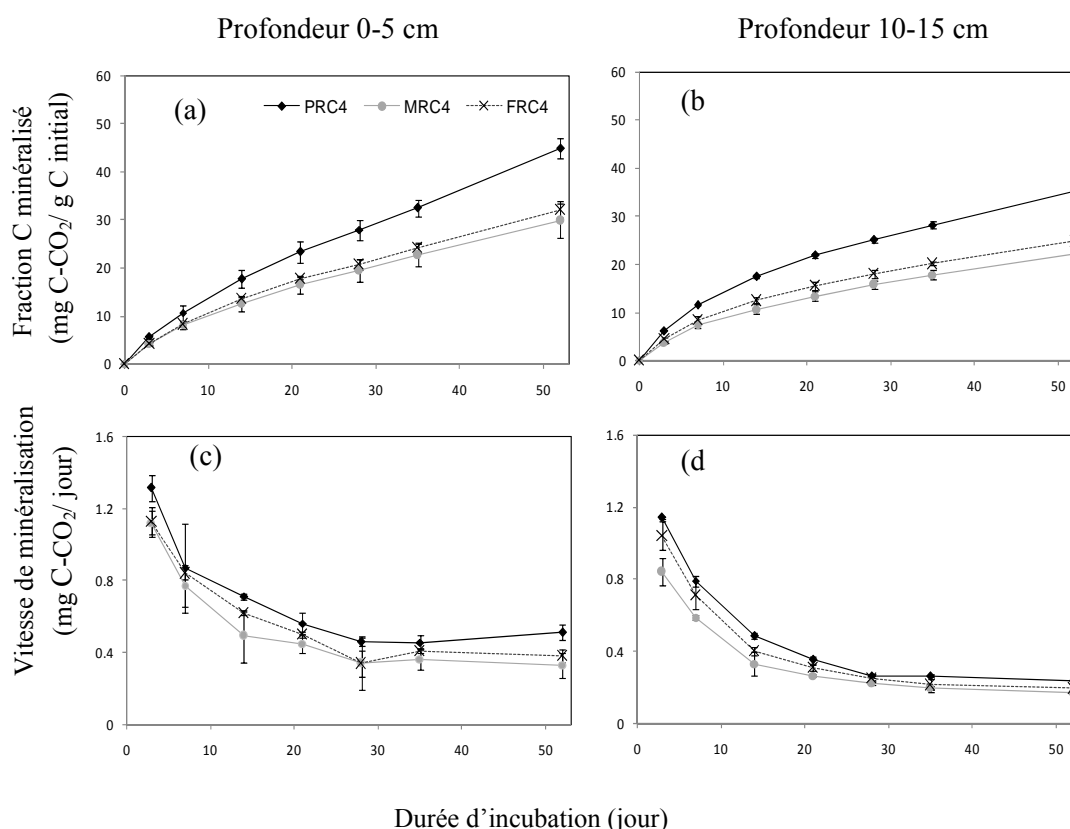


Figure 8 : Proportion de C minéralisé (a et b) et évolution de la vitesse de minéralisation (c et d). PRC₄ = échantillon composite de sol le plus riche en C₄; MRC₄ est celui moyennement riche en C₄ et FRC₄, le moins riche en C₄.

Le rapport isotopique de CO₂ issu de la minéralisation a été légèrement plus élevé que celui de l'échantillon de sol avant l'incubation. Par exemple, pour PRC₄ et FRC₄ dont les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ du sol avant l'incubation sont de -15,91 et -19,58‰ respectivement, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ du CO₂ prélevé au troisième jour après l'incubation sont de -14,21 et -19,69‰ respectivement. Cette augmentation des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ dans le gaz émis traduit la minéralisation

¹⁹ La différence observée pouvant s'expliquer par la variabilité de minéralisation interne aux échantillons

quelque peu sélective des isotopes de C. Le C des plantes à photosynthèse C_4 a été plus minéralisé que celui des plantes à photosynthèse C_3 lors de l'incubation.

La vitesse²⁰ de minéralisation de C a baissé du début de l'incubation jusqu'au 21^{ème} jour avant de se stabiliser à des niveaux qui sont demeurés légèrement élevés pour les échantillons de sol les plus riches en C_4 (Fig. 8c et d). Ce niveau de stabilité des vitesses suppose que la minéralisation demeurerait vraisemblablement plus intense dans les échantillons de sol les plus riches en C_4 si l'incubation avait été poursuivie au-delà des 52 jours. Comme rapportée par Sorensen et *al.* (1996), la différence de vitesses de minéralisation de C pour différents types de matière organique intervient en général pendant les premiers jours d'incubation.

L'effet de la composition isotopique de C sur les quantités de C minéralisé tel que observé dans la présente étude s'expliquerait par l'âge de C des plantes à photosynthèse C_4 qui serait plus faible que celui des plantes à photosynthèse C_3 dans les échantillons de sol incubés. En effet, Alvarez et *al.* (1998), Whalen et *al.* (2000) et Swanston et *al.* (2002) ont observé que la quantité de C minéralisé lors d'une incubation augmente fortement avec la quantité de matière organique fraîche (MOF) contenue dans l'échantillon de sol. La MOF pouvant contribuer entre 65 et 80% à la quantité de C minéralisé. La parcelle étudiée ici étant une jachère à graminées, la MOF du sol est majoritairement celui des plantes à photosynthèse C_4 . Les échantillons de sol les plus riches en C des plantes à photosynthèse C_4 , sont donc ceux qui contiennent plus de MOF et ont en conséquence présenté des vitesses de minéralisation les plus élevées. Les échantillons les moins riches en C des plantes à photosynthèse C_4 et pour lesquels la vitesse de minéralisation a été faible, correspondraient aux emplacements de ligneux dans la végétation primaire. La raison pour laquelle la MOF se minéralise plus fortement que la matière organique ancienne (MOA) réside essentiellement en la facilité avec laquelle les microorganismes de sol accèdent à chaque catégorie de MO (Monrozier et *al.*, 1991 ; Golchin et *al.*, 1994). La MOA étant plus minéralisée et fortement séquestré dans les particules fines du sol, elle est moins accessible aux microorganismes. Par ailleurs, Amato et *al.* (1992) et Ladd et *al.* (1995) ont expliqué la différence de vitesses de minéralisation entre les types de MO par l'importance dans le sol étudié des microorganismes associés à chacun d'eux.

La vitesse de minéralisation de C évaluée par incubation ne peut, certes, être comparée à celle paramétrée (K_2) à travers la modélisation, puisque les conditions réelles sur le terrain ne sont

²⁰ Quotient de la quantité de C minéralisé entre deux prélèvements de gaz par le nombre de jours entre les deux prélèvements

pas optimales comme celles d'incubation²¹. La variabilité de la vitesse de minéralisation de C évaluée par incubation pour des échantillons prélevés côte à côte traduit cependant la nécessité de considérer la sensibilité des modèles à K_2 comme l'un des critères de choix de modèles performants (Cf. article). La minéralisation de C avec des vitesses différentes traduit d'autre part l'existence dans le sol de différentes fractions de C dont certaines se minéralisent moins vite que d'autres. Ces résultats sont concluants à ceux de la modélisation qui ont révélé une meilleure performance pour les modèles multi-compartimentaux et à ceux de l'hydrolyse acide. La dépendance de la vitesse de minéralisation de C à sa composition isotopique qui est un paramètre variable du sol, traduit également la variabilité spatiale des différentes fractions de C. Dans le cas de la parcelle étudiée ici, la fraction de C se minéralisant faiblement serait élevée dans les zones riches en C_3 . Enfin, cette dépendance de la vitesse de minéralisation des isotopes de C, suppose la variabilité de ces différentes fractions de C d'une parcelle à une autre. Sur une parcelle dont la végétation primaire a été la forêt (C_3) comme c'est le cas à Elavagnon, la fraction de C se minéralisant faiblement ne serait pas du même ordre de grandeur que sur une parcelle issue d'une savane (cas de Dalanda).

²¹ Température et humidité ont été maintenues constantes d'une part puis la structure et texture du sol ont été d'autre part modifiées à travers le tamisage.

Chapitre 4

Effet de la fertilisation minérale avec restitution au sol des résidus de récolte sur l'évolution à long terme des concentrations du sol en C et nutriments

Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est d'analyser, à partir des données observées pendant 20 ans au Sud du Togo, l'effet de la dose de fertilisation minérale avec restitution au sol des tiges de maïs sur l'évolution de la fertilité de la terre barre. Les effets de deux doses de fertilisation NPK (appliquées sous le maïs à la première saison et sous le cotonnier à la seconde saison) ont été comparés à ceux de deux traitements témoins. Les deux doses de fertilisation NPK testées sont : (i) la dose recommandée par la recherche (RR) et (ii) la dose 1,5 fois plus élevée que celle recommandée (1.5RR). Les traitements témoins sont : (i) la culture du maïs et du cotonnier sans fertilisation minérale (No-fertiliser) et (ii) le labour puis sarclage de la parcelle sans qu'elle ne soit ensemencée ni fertilisée (Tillage-NoCrop). L'effet des traitements a été analysé à travers (i) la modélisation de la dynamique dans le long terme des stocks de C et de minéraux et (ii) le calcul, au moyen du modèle QUEFTS, de la potentialité du sol à fournir dans le long terme des nutriments aux cultures. Les résultats ont montré que la production en terre de barre du maïs et du coton-graine n'est pas viable sans fertilisation minérale. En moyenne, les rendements de maïs sans fertilisation NPK qui étaient de 1,5 à 2 t ha⁻¹ à la défriche ont baissé pour ne représenter qu'environ 0,5 t ha⁻¹ après 10 années de culture. Ceux de coton-graine pour ce traitement sont passés de 1,5 t ha⁻¹ à la défriche à près de 0,5 t ha⁻¹ après seulement 5 années de culture. Les rendements de maïs et de coton-graine avec la dose recommandée de NPK ($2,2 \pm 0,8$ et $2,0 \pm 0,7$ t ha⁻¹ respectivement) n'ont pas nettement augmenté lorsque cette dose a été augmentée de 50%. Bien que les apports de C au sol ont été plus élevés pour les traitements avec fertilisation (nuls pour Tillage-NoCrop) et que le bilan N apparent a été moins négatif pour ces traitements fertilisés que non-fertilisés, la baisse des taux de C et N dans le sol a été similaire pour tous les traitements. Ce résultat indique que la baisse des stocks de C et N en terre de barre est plus déterminée par les changements pédoclimatiques induits par la défriche et le labour continu que par des quantités de C et N qui sont annuellement apportées au sol. Les teneurs du sol en P assimilable ont baissé pour tous les traitements, tandis que celles de K échangeable ont légèrement augmenté pour les traitements avec fertilisation et ont baissé pour ceux sans fertilisation. La baisse du pH du sol a été plus

prononcée pour les traitements avec fertilisation minérale et a été associée à la baisse des concentrations de Ca et Mg du sol. Comparativement au traitement sans fertilisation, la baisse des concentrations de Ca et Mg a été respectivement de 20 et 40% plus élevée lorsque les minéraux N, P et K ont été apportés. De ces évolutions contrastées (augmentation de K puis forte baisse de Ca et Mg), l'effet de la fertilisation NPK a été traduit par un déséquilibre entre les bases échangeables du sol. La potentialité du sol à fournir N et P aux cultures a baissé dans le long terme à cause de la baisse des stocks de C, N et de l'acidification du sol. L'acceptation selon laquelle la fertilité des sols cultivés en Afrique de l'Ouest peut être maintenue à travers des doses fortes de fertilisation NPK et la restitution au sol des résidus de récolte, n'a pas été soutenue par les résultats de cette étude. Nous avons conclu que l'apport de Ca/Mg, couplé à celui de NPK à la dose RR, serait (plus qu'un surdosage de P et K) une meilleure option pour gérer la fertilité minérale de ces sols. Le labour minimum, associé aux apports externes de C, permettrait de mieux gérer leur fertilité organique.

Article

Long-term mineral fertiliser use and crop residue restitution do not compensate for carbon and nutrient losses from a Ferralsol under continuous cultivation

K. Kintché¹, H. Guibert², J.M. Sogbedji³, J. Levêque⁴, B. Bonfoh¹, P. Titttonell^{2*}

¹Institut Togolais de Recherche Agronomique, Centre de Recherche Agronomique de la Savane Humide, BP 01 Anié, Togo.

²CIRAD-Persyst, URSCA, TA B-102/02 Avenue Agropolis, 34898 Montpellier Cedex 5, France

³Université de Lomé, Ecole Supérieure d'Agronomie, BP 1515, Lomé, Togo

⁴Université de Bourgogne, UMR BIOGEOSCIENCES, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

*Correspondance: CIRAD-Persyst, URSCA, TA B-102/02 Avenue Agropolis, 34898 Montpellier Cedex 5, France. Email : pablo.tittonell@cirad.fr

Keywords: Southern Togo; Soil fertility management; QUEFTS; Soil carbon modelling; Maize; Cotton

Field Crops Research

(Soumis le 3 août 2011)

Abstract

It has been repeatedly argued that mineral fertiliser application combined with crop residue restitution can sustain long-term agricultural productivity of West African soils. Using 20-year experimental data from southern Togo, we analysed the effects of two rates of mineral NPK fertiliser application with maize residue restitution to soil, on the long-term dynamics of soil C and nutrients contents, as compared with two control treatments: cropping without mineral fertilisers (No-Fertiliser) and soil tillage without planting a crop (Tillage-NoCrop). Treatments effects were analysed through (i) modelling long-term changes in C and nutrient stocks and (ii) using the model QUEFTS to calculate soil nutrient supply and to analyse long-term effects of fertiliser use on soil productivity and its responsiveness to applied fertilisers. Our results indicate that productivity of maize and notably of cotton cannot be sustained for long-term in this Ferralsol without nutrient inputs. On average, maize yields without fertilisers decreased from 1.5-2 t ha⁻¹ after plot clearing to 0.5 t ha⁻¹ after 10 years of cultivation, while cotton yields decreased from 1.5 t ha⁻¹ to 0.5 t ha⁻¹ only after 5 years. Both maize and cotton, responded equally to mineral fertilisers applied at a rate recommended by research (RR) and at this rate increased in 50% (1.5RR). Although C inputs to soil for RR and 1.5RR were the largest (nil for Tillage-NoCrop) and their partial N balance less negative, the rapid decline in soil C and N contents did not differ substantially from the control treatments. Soil available P decreased for all treatments, while exchangeable K concentration increased under RR and 1.5RR and decreased in the control treatments. A decline in soil pH was more pronounced in fertilised plots, in association with a decline in exchangeable Ca and Mg concentrations, 20 and 40% more pronounced than in unfertilised plots. This led to misbalances in the cation equilibrium in fertilised plots. Soil potential to supply N and P as calculated with QUETFS decreased in long-term, as a consequence of soil C decline and soil acidification. The long-term impact of continuous fertiliser use manifest more in the responsiveness of the soil to applied fertilisers than in soil productivity without fertilisers, as soils that did not receive fertilisers became non-responsive to fertilisers over time. We conclude that soil C and N decline in this Ferralsol was more determined by a change in soil conditions due to vegetation clearance and continuous tillage than by the quantities of C or N inputs added annually. The notion that soil organic matter stocks can be maintained through crop residue restitution to cultivated soils is not supported by the results of this study.

1. Introduction

Soil fertility decline has been signalled as the major determinant of poor agricultural productivity in sub-Saharan Africa, together with inefficient water management and use of poor-yielding varieties (Vanlauwe et al., 2001). Soil fertility decline is reflected by a decrease in soil carbon content and nutrient availability, soil erosion and soil acidification (Vlek et al., 2008). Decline in soil C and nutrient contents is the result of unsuitable agricultural practices such as burning, absence of soil organic matter restoration or insufficient use of mineral fertilisers (de Ridder et al., 2004; Bationo et al., 2006). Africa is the continent with the lowest mineral fertiliser application rates, averaging less than 20 kg ha⁻¹ year⁻¹, as compared to 100 kg ha⁻¹ worldwide or 160 kg ha⁻¹ in Asia (IFDC, 2005). In West Africa, fertiliser application rates are yet lower, in the order of 9 kg ha⁻¹ (FAO Stat, 2010). Reasons ascribed to such limited application rates in this region are a lack of available resources, insufficient access to markets, and erratic rainfall conditions that prevent cost-effective fertiliser applications.

According to FAO estimates, to be able to achieve the annual growth rate of 6% in agricultural production set by the African Union, current fertiliser applications must be doubled in West Africa by 2015. Such estimations are only indicative and lack quantitative rigour, as they do not consider the diversity of agroecological and soil conditions, or the diversity of crops and farming practices that coexist throughout the region. Research on soil fertility management in West Africa (e.g., Pichot et al., 1981; Pieri, 1989) indicated the need to combine applications of organic and mineral fertilisers as a means to maintain or restore the productivity of these soils, subject to high organic matter decomposition rates. This is however hampered by sparse livestock densities not able to provide sufficient manure to amend soils, non-integration of stockbreeding with crops production, or by the removal of crop residues from agricultural fields for other uses (fodder, fuel). Mineral fertilisers are thus one of the few realistic options left for local farmers to manage soil fertility. Although current fertiliser prices may prevent their economic use on the major staple crops in the region, their application may be justifiable when a cash crop is grown in the rotation.

It has been repeatedly argued that mineral fertiliser applications coupled with crop residue restitution to the soil can sustain agricultural productivity through maintaining (or even increasing) soil organic matter levels in West African soils (e.g., Bekunda et al., 1997; Bationo et al., 2006). However, little evidence is available over long periods of time to support this hypothesis. Fertiliser recommendations are needed that target specific soil types,

climatic zones and cropping systems. Fertiliser application rates and practices should be designed to ensure the efficient capture of available nutrients by crops and their conversion into economic yield (Chikowo et al., 2008), while contributing to the maintenance of soil productivity attributes. C and nutrient losses from continuously cultivated soils are the result of organic matter decomposition (which is also necessary to make nutrients available to crops), crops nutrient uptake, leaching, erosion and gaseous losses. Fertiliser recommendations should be informed on the relative contribution of each of these processes to inefficient nutrient use. In intensively cultivated soils under bimodal rainfall, where two cropping seasons a year are possible, some of such processes may be seriously enhanced. This is the case for the inherently fertile Ferralsol that dominate the agricultural landscapes of southern Togo. These soils have been cultivated for more than 40 years and received annual fertiliser applications due to the presence of cotton in the crop rotation.

Our objective was to analyse the long-term impact of mineral fertiliser applications on carbon and nutrient dynamics in continuously cultivated soils, to assess the capacity of this practice to maintain soil productivity in the absence of external organic soil amendments. We examined experimental data on soil properties and crop yields collected over a 20-year period in a Ferralsol in southern Togo, which has been cleared of native vegetation the year before the experiment started. A very informative treatment in which the soil was tilled but no crop was grown throughout the experiment was also monitored. The productivity and responsiveness of this soil after 20 years under different mineral fertilisation regimes was then assessed through simulating crop responses to increasing nutrient additions using the model QUEFTS.

2. Materials and methods

2.1 Experimental site

Experiment was conducted at Kouvé (6° 41' N, 1° 25' E, 150 masl) in southern Togo. The soil type was a Ferralsol locally known as '*terre de barre*' (Saragoni et al., 1991), characterised by high iron oxide and kaolinite clay contents. Soil properties after woodland clearance are shown in Table 1 and indicate suitability for agricultural production, apart from a low exchangeable K content.

Table 1: Soil characteristics at the onset of the experiment

Soil layer (cm)	Particle size distribution (%)			Soil organic C (g kg ⁻¹)	pH in water (1:2.5)	CEC (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)
	Clay	Silt	Sand			
0-20	17.2 ±0.6	4.2 ±0.2	78.6 ±0.9	24.0 ±2.0	6.1 ±0.4	5.7 ±0.9
20-40	25.2 ±1.9	4.2 ±0.6	70.6 ±1.4	10.3 ±1.2	5.5 ±0.2	5.4 ±0.8
	Total soil N (g kg ⁻¹)	Soil P (mg kg ⁻¹)		Exchangeable bases (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)		
		Total	Olsen	K+	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
0-20	2.2 ±0.17	222 ±13.1	41.3 ±1.6	0.26 ±0.00	3.63 ± 0.78	1.21 ±0.14
20-40	1.1 ±0.13	223 ± 7.8	27.2 ±1.8	0.12 ±0.01	1.43 ±0.04	1.31 ±0.11

The climate is tropical, characterised by a highly variable rainfall that averaged 992 mm year⁻¹ between 1972 and 2009 (and 948 mm year⁻¹ during the experiment period) with a minimum of 530 and a maximum of 1341 mm year⁻¹ (Figure 1). Rainfall is bimodal, which is suitable for a first crop cycle between April and July and a second cycle from September to November. On average, 51 and 29% of the total annual rainfall is recorded during the first and second crop seasons, respectively. In recent years, the second cropping season has been markedly hampered by erratic rainfalls. Temperatures are lowest in August (22-27°C) and highest in March-April (24-32°C).

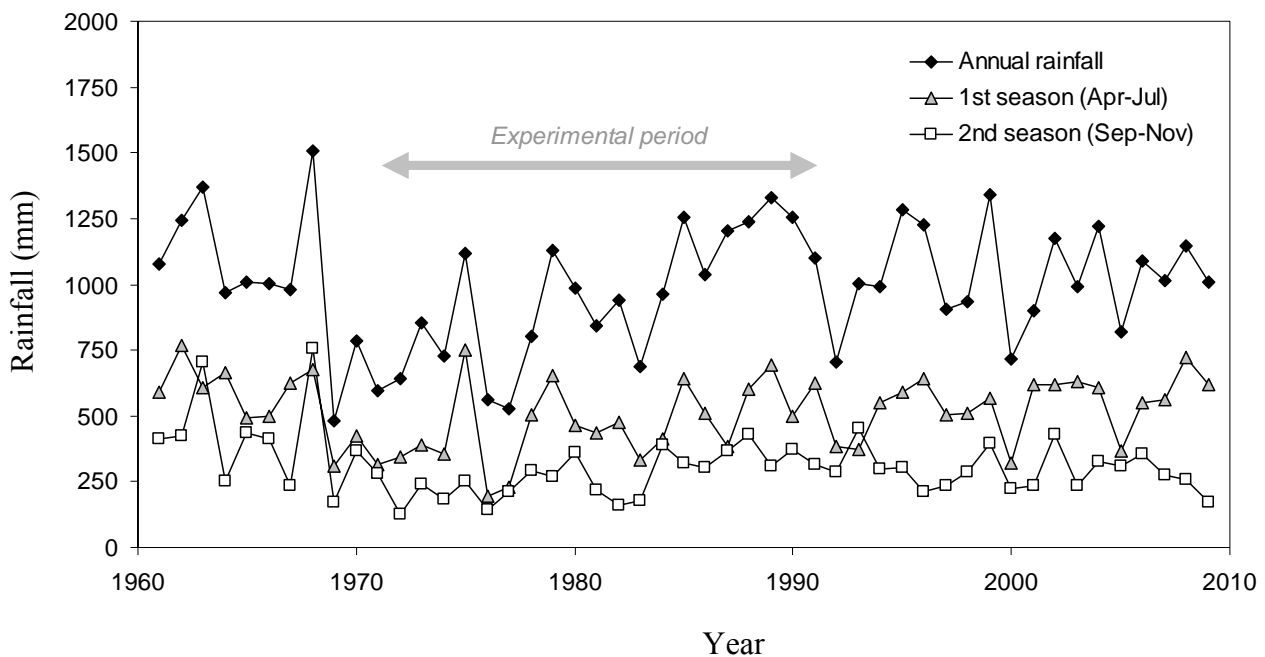


Figure 1: Total annual, first season and second season rainfall collected at the experimental site. The grey arrow indicates the period during which the present experiment was conducted.

2.2 Long-term experiment

The experiment was conducted from 1972 to 1992. It consisted of comparing four treatments: two rates of NPK mineral fertiliser application to maize in the first season and to cotton in the

second, one control without fertilisers, and one control without a crop. The latter (Tillage-NoCrop), involved tilling and weeding the plot as soon as weeds emerged, but the plot was not sown or fertilised. In the three other treatments, maize (local variety) was cropped in the first season followed by cotton in the second season without fertilisation (No-Fertiliser), with mineral fertilisers applied at the research-recommended rate (Fertiliser-RR), and then at 1.5-fold the research-recommended rate (Fertiliser-1.5RR). The cotton varieties sown were provided by local extension services and they differed over time (BOU 78, STAM 129A and STAM 279A). Recommended NPK fertiliser application rate (kg ha^{-1}) was 31-8-22 for maize and 31-8-62 for cotton. For cotton crop, a sulphur and boron fertiliser supplement was applied at a rate of 9 and 2 $\text{kg ha}^{-1}\text{year}^{-1}$, respectively. N was applied in two steps: 8 kg ha^{-1} for RR and 12 kg ha^{-1} for 1.5RR, 20 days after sowing and then 23 and 34 kg ha^{-1} , respectively, 40 days after sowing. P and K were applied once at the time of the first N application. Each treatment was replicated eight times on 126 m^2 elementary plots. After each harvest, maize stalks were cut and left in the inter-rows, whereas cotton plants were uprooted and burnt on the experimental plots, as done locally for phyto-sanitary reasons. Harvested crops were weighed and annual yields calculated. From 1973 to 1991, except for 1981, soil samples were collected three times a year: before the first fertiliser application under maize (April), before the first fertiliser application under cotton (July), and at the end of the cotton cycle (November). Five soil samples (0-20 cm) were taken along a diagonal of each elementary plot and then mixed to obtain one composite sample per treatment.

2.3 Laboratory analysis

Soil concentrations of C, N and P, exchangeable cations (Ca, Mg and K), cation exchange capacity (CEC) and pH-water of 54 soil samples per treatment were determined. Total P was not analysed as of 1977. Soil C was analysed using the wet combustion method (Walkley and Black, 1934) and total N, using the modified Kjeldahl method (Hanotiaux et al., 1975). CEC and exchangeable cations were analysed using ammonium acetate 1N at pH 7 (Hanotiaux et al., 1975). Extractible P was analysed using the Olsen method (Olsen et al., 1954), and total P by boiling acid attack (Dabin, 1956). The pH-water was determined in a suspended soil-water (1:2.5) solution (Solomon et al., 2007).

Total stock of soil C, N and P (t ha^{-1}) were calculated from measured concentrations and soil bulk densities (BD), calculated as follow (Howard et al., 1995; Kätterer et al., 1999):

$$BD = 1.3 - (0.274 * \log \% C) \quad (\text{Eqn.1})$$

where %C is the soil C concentration expressed in g/100 g of soil.

2.4 Data analysis

The long-term dynamics of soil carbon and nutrient contents were analysed using single exponential models. Soil data and crop yields during the first 3 years after plot clearing (1972-1974) were inherently highly variable, so that there were no clear-cut between-treatment differences due to such initial plot heterogeneity. These data were therefore not used in the analyses.

Soil carbon

In central Togo, Kintché et al. (2010) tested soil C models of different complexities and noted that AMG model (Andriulo et al., 1999) was amongst of the most effective models for simulating C contents in these tropical soils, which typically have a high stable C content (Zingore et al., 2005). In the present study, AMG model was calibrated and applied to quantify the effect of each treatment on soil C patterns. AMG model considers two soil C compartments: labile and stable. Annual C inputs in the labile pool are equal to K_1M , while C outputs are equal to $K_2Y_{(t)}$. Where, M is the total C returned to the soil via crop residues or organic amendments and $Y_{(t)}$ is soil C content at time t . The proportionality coefficient K_1 depends on biomass quality, C/N ratio and lignin content, whereas K_2 depends on soil properties, environmental conditions, and can be modified by agricultural practices. Stable C compartment (Y_{st}) is considered to decompose extremely slowly and therefore taken as a constant. The stock of total C at time t is calculated as:

$$Y_{(t)} = Y_{st} + \frac{K_1M}{K_2} + (Y_0 - Y_{st} - \frac{K_1M}{K_2}) * \text{Exp}(-K_2 * t) \quad (\text{Eqn.2})$$

The inputs of C to the soil (M) were calculated from data on crop yields, harvest indices, C content in biomass and information on crop residues management. Model was calibrated using the method described by Kintché et al. (2010). Given calculated M and observed $Y_{(t)}$ values, the K_1 , K_2 and Y_{st} values that minimized the bias between simulated and observed soil C stocks were determined. This bias was evaluated using the Root Mean Squared Error (RMSE) and the determination coefficient (r^2).

Soil nutrients

Similarly, a mono-exponential equation with an asymptotic term (Y_{st}) was used to describe changes in soil nutrient contents and apparent equilibrium ratios:

$$Y_{(t)} = Y_{st} + (Y_0 - Y_{st}) * \text{Exp} (-K_2 * t) \quad (\text{Eqn.3})$$

Equation 3 is one variant of Equation 2 and assumes that external nutrient inputs have an insignificant effect on stock or concentration of this nutrient in the soil. K_2 and Y_{st} , respectively, represent the annual variation rate and the soil stock or concentration of the considered nutrient at the end of the considered period. K_2 and Y_{st} were used to quantify the effect of the treatments on soil nutrient concentration patterns. Edwards and Penny (2000) and Hao et al. (2006) adopted a similar approach to evaluate exchanges between exchangeable and non-exchangeable K pools. Ratios such as the soil Mg to K concentration ($[Mg]/[K]$), the sum of Mg and Ca concentrations to K concentration ($([Mg] + [Ca]) / [K]$) were also used to assess the long-term effect of the treatments on the base exchange equilibrium. K, Mg and Ca supplies to plants were assumed to be optimal when the $[Mg]/[K]$ and $([Mg] + [Ca]) / [K]$ range from 2 to 20 and 15 to 40, respectively (Duchaufour, 1979).

2.5 Crop yields and partial nutrient balances

A potential contribution of rainfall to crop response to fertiliser application was analysed using a boundary logistic model (Fermont et al., 2009). Nutrient use efficiencies were analysed through a Partial Factor Productivity ($PFP = Y_{NPK}/F_{NPK}$) and an Agronomic Efficiency ($AE = Y_{NPK} - Y_0$). Where, Y_{NPK} is a crop yield with NPK fertiliser application, F_{NPK} a corresponded rate of applied NPK and Y_0 a crop yield without fertiliser application. Partial nutrient balances were calculated as the difference between nutrient inputs to soil through mineral fertilisation and nutrient output in crop harvests. Crop nutrient uptakes were calculated by multiplying each crop grain, shoot and root biomass by a mineral content in considered biomass, as retrieved from literature (Table 2).

Table 2: Range (min-max) of nutrient concentrations in crops used in the study (in % of dry matter)

Nutrient	Cotton			Maize		Reference
	Seed	Lint	Shoot	Grain	Shoot	
Nitrogen	2.89 - 7.73	0.12 - 0.34	0.82 - 2.27	1.02 - 1.85	0.29 - 1.28	Oiken et al. (1998), Cox et al. (2001), Berenguer et al. (2008)
Phosphorus	0.27 - 2.55	0.02 - 0.15	0.08 - 0.85	0.13 - 0.63	0.05 - 0.33	
Potassium	0.82 - 8.0	0.26 - 0.65	0.80 - 2.20	0.22 - 0.49	0.52 - 1.67	

Seed-cotton was considered in the proportions of 0.42 and 0.58 for lint and seeds, respectively. Shoot and root biomass were calculated using average values of Shoot:Grain (SG) and Shoot:Root (SR) ratios of 1.3 and 0.23 for maize and 1.4 and 0.13 for cotton, respectively (Gregory and Reddy, 1982; Anderson, 2002; Craufurd et al., 2002). Nutrient

outputs were calculated according to crop residue management practices. As maize residues were left in the plots, only nutrients contents in grain was considered as exported. For cotton, where stems and roots were burnt on the plots, N contents in seed-cotton, stems and roots was considered as N output; whereas only P and K in seed-cotton were considered as nutrient outputs.

2.6 Simulating nutrient supply and crop responses

We used the model QUEFTS (Janssen et al., 1990) to: (i) assess the effect of different treatments on soil potential to supply N, P and K throughout the duration of the experiment, and (ii) diagnose maize response to applied fertilisers in soils that underwent different fertilisation regimes, as an indicator of soil productivity (Witt et al., 1999; Pathak et al., 2003; Titonell et al., 2008).

Model overview

Janssen et al. (1990) and Smaling et al. (1993) described the QUEFTS model in detail. Here, we briefly reviewed its central concepts and assumptions. The model assumes that maize yield is a function of the potential soil supply of N, P and K, the amount of these nutrients as in fertilisers, and their interaction. The model estimates maize yields through four calculation steps:

1. Soil physicochemical data are used to evaluate soil potential native to supply N (SN), P (SP) and K (SK), using empirical equations (Janssen et al., 1990).

$$SN = 17 * N_{Org} * (pH - 3) \quad (\text{Eqn. 4})$$

$$SP = 0.5 * P_{Olsen} + 0.35 * C_{Org} * (1 - 0.5 * (pH - 6)^2) \quad (\text{Eqn.5})$$

$$SK = \frac{250 * (3.4 - 0.4 * pH) * K_{exch}}{2 + 0.9 * C_{Org}} \quad (\text{Eqn.6})$$

SN, SP and SK are expressed in kg ha⁻¹ of N, P and K, respectively; N_{org} and C_{org} in g kg⁻¹ of C and N; P_{olsen} in mg P kg⁻¹, K_{exch} in mmol⁺ kg⁻¹.

Smaling et al. (1993) have modified some of these equations to render them less site-specific than the original ones. Modified SN equation integrates air temperature (T) and soil clay content, thus indirectly considering the effects of the environment:

$$SN = 45 * N_{Org} * \left(\frac{2^{\frac{(T-9)}{9}}}{\log(15 * Clay \%)} \right) \quad (\text{Eqn.7})$$

In our case, the temperature factor ($2^{(T-9)/9}$) was 1.92 and the clay factor, $\log(15*\text{clay}\%)$, was 2.81.

QUEFTS assumes by default that a maize crop takes up 50, 10 and 50% of added fertiliser N, P and K, respectively.

2. The model considers that an increase in the soil native potential to supply one nutrient enhances its potential to supply another nutrient (positive interaction). Thus, actual (UN, UP and UK) soil potential to supply one of the nutrient is calculated according to its native potential to supply the two other nutrients.

3. The model assumes that for zero maize grain production, a minimum of 5, 0.4 and 2 kg ha⁻¹ for N, P and K, respectively are taken up by the plant. Moreover, nutrient uptakes for a same maize yield level may differ. They are minimal (dilution) or maximal (concentration) when the soil native potential to supply nutrients is minimal and maximal, respectively. Hence, when considering the uptakes of each nutrient at its minimum value (30, 200 and 30 kg ha⁻¹ for N, P and K, respectively) and at maximum value (70, 600 and 120 kg ha⁻¹ for N, P and K, respectively), the model calculates six maize yield levels. The maximum grain-maize production (Y_{\max}) in these tropical soils under rainfall conditions was set at 7–10 t ha⁻¹.

4. The last step estimates real maize yields as the mean of six yield levels calculated in previous step.

Model calibration, testing and scenario analysis

In the present study, each equation giving the SN (Eqn 4 and 7) was tested by comparing SN values to N uptakes calculated from total maize biomass. For No-Fertiliser treatment, where all nutrients were taken up from the soil, SN, SP and SK values had to be higher or at least equal to nutrients uptake evaluated in crop biomass. For others treatments with fertiliser added, SN, SP and SK values were expected to be below than these nutrient uptakes, since a share came from fertilisation. The equation in which SN values are most closely correlated to N uptakes was used in subsequent steps of the model to simulate maize yield. Further model calibration involved adjusting, in the order of reported values on similar soils and environments (Vanlauwe et al., 2001; Phongpan et al. 2003), certain parameters in order to minimise bias between simulated and observed maize yields. The adjusted model parameters were: (i) fertiliser fractions taken up by the maize crop, (ii) minimal nutrient uptakes (corresponding to zero grain-maize production) and (iii) maximum theoretical maize yield

potential (Y_{\max}). The version of the model calibrated in this way was used to assess the long-term effect of the four experimental treatments on soil productivity without nutrient inputs and with increasing rates of mineral fertiliser applications. The simulated fertiliser application rates ranged from 0 to 300 kg ha⁻¹ for N, with P and K at recommended rates. Response of maize to these application rates was simulated for the years 1973, 1978, 1983 and 1988, corresponding to respectively 2, 7, 12 and 17 since natural vegetation clearance. The model was parameterised with the observed soil parameters at each of these years.

3. Results

3.1 Long-term changes in crop productivity, soil carbon input and nutrient uptake

Both maize and cotton responded equally to mineral fertilisers applied at the recommended rate (RR) or at this rate increased in 50% (1.5RR) (Figure 2).

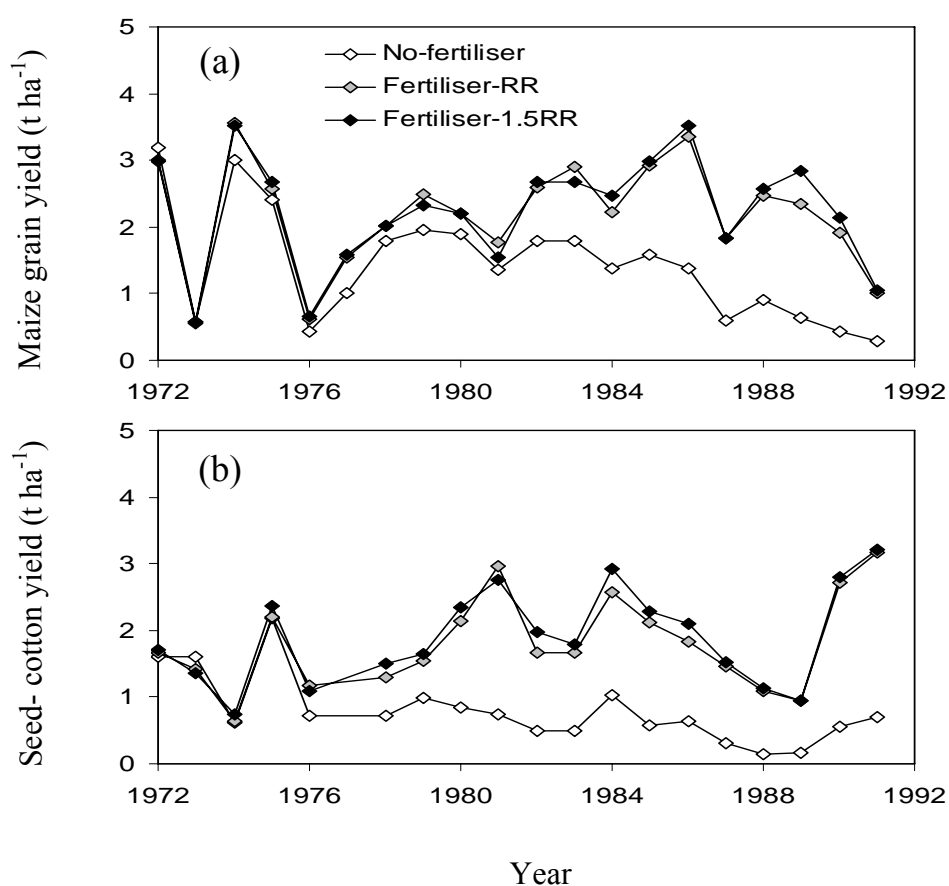


Figure 2: Maize grain (a) and seed-cotton (b) yields under different mineral fertiliser application regimes over the entire experimental period. Maize was grown in the first rains season and cotton in the second. RR: recommended rates of N, P and K.; 1.5RR: recommended rates increased in 50%.

Yields measured in fertilised plots did not differ from non-fertilised control plots during the first years after woodland clearance. Control plots yielded significantly less cotton thereafter but only slightly less maize than RR and 1.5 RR during the first decade of the experiment. Maize yields of up to 1.5-2 t ha⁻¹ were obtained from non-fertilised control plots during this period, to decrease gradually to less than 0.5 t ha⁻¹ during the second decade. Over time, cotton yields were sustained at an average of 2.0 ± 0.7 t ha⁻¹ year⁻¹ in plots receiving fertilisers, while control yields plummeted to less than 0.5 t ha⁻¹ year⁻¹ after 10 years. Cotton crops grown in the second season likely benefited from residual fertiliser applied to maize, especially when maize yields were poor due to limited rainfall, plus a carryover effect induced by the incorporation of maize residues in the soil prior to planting cotton. Thus, actual nutrient availability for cotton was larger than what is indicated by the fertiliser application rates. Yield variability was largely determined by rainfall amount and distribution, particularly on fertilised plots (Fig. 3).

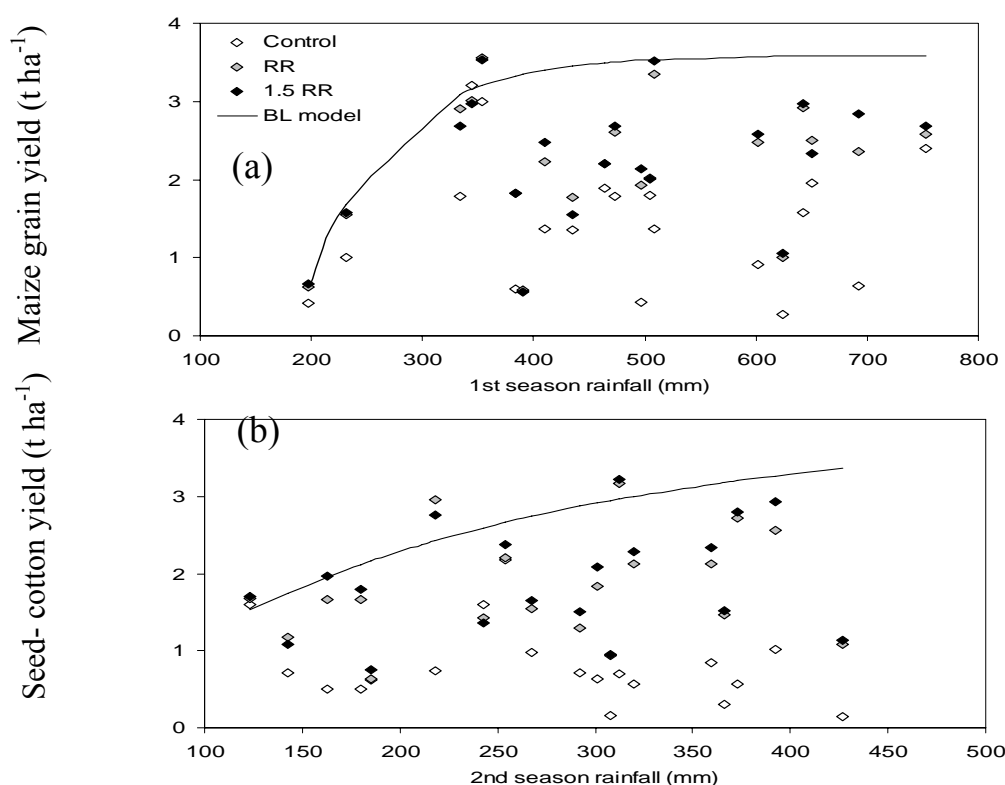


Figure 3: The relationship between maize grain (a) and seed-cotton (b) yields and seasonal rainfall under different mineral fertiliser application regimes over the entire experimental period. Maize was grown in the first rains season and cotton in the second. Control: non-fertilised crops; RR: recommended rates of N, P and K.; 1.5RR: recommended rates increased in 50%. The boundary line models are logistic curves fitted to the set of maximum yield values at each rainfall interval (cf. section 2.5).

Attainable maize yields were in the order of 3.2 t ha^{-1} , with an apparent critical rainfall threshold of around $350 \text{ mm season}^{-1}$ (Figure 3a). However in most years yields were about two thirds of the attainable yield levels, even when fertilisers were used. The logistic model fitted to the upper boundary of cotton yields did not reveal a critical rainfall threshold, but a regular increase in the maximum attainable yield with rainfall between 100 and 400 mm season^{-1} (Figure 3b). Irrespective of total rainfall, crop yield and their response to fertilisers were poor when crop flowering coincided with drought or rainfall excess. Fertilisers applied at RR were more cost-effective, as indicated by the respective partial factor productivity: on average, seed-cotton yields per applied fertiliser unit at RR and 1.5RR were respectively 57 and 41 $\text{kg kg}^{-1} \text{ N}$, 225 and 158 $\text{kg kg}^{-1} \text{ P}$, and 28 and 20 $\text{kg kg}^{-1} \text{ K}$; while those of maize were 74 and 48 $\text{kg kg}^{-1} \text{ N}$, 289 and 187 $\text{kg kg}^{-1} \text{ P}$, and 102 and 67 $\text{kg kg}^{-1} \text{ K}$.

These yield levels and the associated crop residue management (maize straw left in the plot, cotton plants uprooted and burnt on the plot), determined different rates of C inputs to the soil and different levels of nutrient uptake by crops and removal in harvest (Table 3). C inputs to the soil in unfertilised control plots only represented, on average, 56% of C inputs when crops were fertilised. C inputs to the soil over the 20 years of the experiments were in the order of 2.5 t ha^{-1} in unfertilised control plot and 4.8 t ha^{-1} in fertilised plots, irrespective of the application rate. Crop N, P and K uptakes were greater from fertilised plots, often more than double with respect to control plots, and their respective partial balances more negative in control plots. Mineral fertiliser applications at 1.5RR led to balanced N and P management and to substantial accumulation of K in the soil.

Table 3: Average carbon input to the 20 cm topsoil layer, N, P and K uptake from the soil and partial N, P and K balances (calculated from yield data and according to the crop biomass management strategy, which consisted of leaving maize straw in the plots, uprooting and burning cotton plants in the plots after harvest)

Treatment	C input to soil ($\text{t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)	Nutrient uptake by crops ($\text{kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)			Partial nutrient balance ($\text{kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)		
		N	P	K	N	P	K
No-fertiliser	0.92 (0.50)	66 (30)	18 (13)	55 (38)	-48(19)	-11(8)	-25(18)
Fertiliser-RR	1.62 (0.57)	132 (60)	35 (28)	111 (69)	-37(40)	-7(17)	29(40)
Fertiliser-1.5RR	1.65 (0.59)	137 (62)	37 (28)	116 (72)	-8(42)	0(18)	68(42)

*Rates of fertiliser N-P-K application were: 62-16-84 and 93-24-112 $\text{kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ for Fertiliser-RR and Fertiliser-1.5RR, respectively

3.2 Effect on soil fertility indicators

The concentration of carbon and nutrients in the 20 cm topsoil layer decreased for all treatments over the experimental period as compared with the initial soil conditions, except for exchangeable K under fertilised crops and for total P in all treatments (Figures 4 and 5). Decline in total C and N concentrations over time was poorly affected by fertiliser application (Fig. 4a and b), even though soil C input and partial N balance were more favourable under 1.5RR fertiliser application (cf. Table 3). Soil C and total N concentrations were significantly correlated ($r = 0.93$; $\alpha = 1\%$) and dropped to less than 30% of their initial values during the first five years of soil cultivation and to about 20% after 20 years. While total P concentrations were relatively steady for all treatments throughout the experiment (around 230 mg kg^{-1} on average - not shown), available P concentration declined substantially over the first 10 years and then tended to improve after this period, particularly under 1.5RR (Fig. 4c).

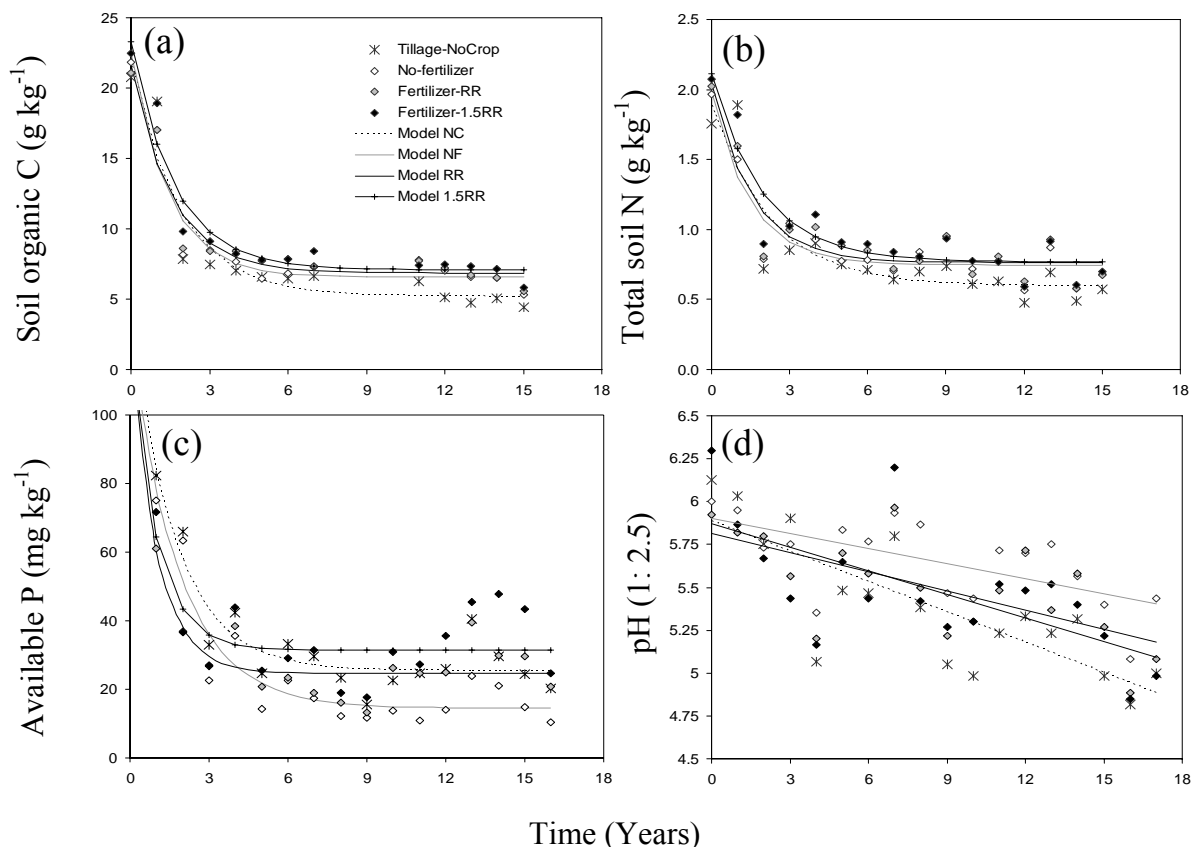


Figure 4: Long term changes in soil organic C (a), total N (b), available P (c) and pH (d) under the four experimental treatments. Tillage-NoCrop: a control treatment in which the soil was tilled but no crop was sown; RR: recommended rates of N, P and K.; 1.5RR: recommended rates increased in 50%. The models are single exponential curves (a-c) or lines (d) fitted to the observations pertaining to the four treatments, for illustrative purposes.

After 20 years of continuous cultivation without fertilisers available P levels declined more than for the other treatments; yet they remained above 10 mg kg^{-1} , a reference level often consider as a threshold for maize response to added P in ferralitic soils (e.g., Tiftonnell et al., 2008). Soil acidification was associated with the NPK fertiliser application rate (Fig. 4d). Contrary to the treatment without fertiliser input, where soil pH only decreased by 0.03 units, it dropped by 0.10 units (i.e. threefold more) when fertiliser was applied at the 1.5RR rate. Decrease in soil pH was 0.04 and 0.05 units for fertilised-RR and Tillage-NoCrop treatments, respectively.

The soil cation exchange capacity (CEC) decreased gradually, following approximately the same trajectory as soil C (Fig. 5a).

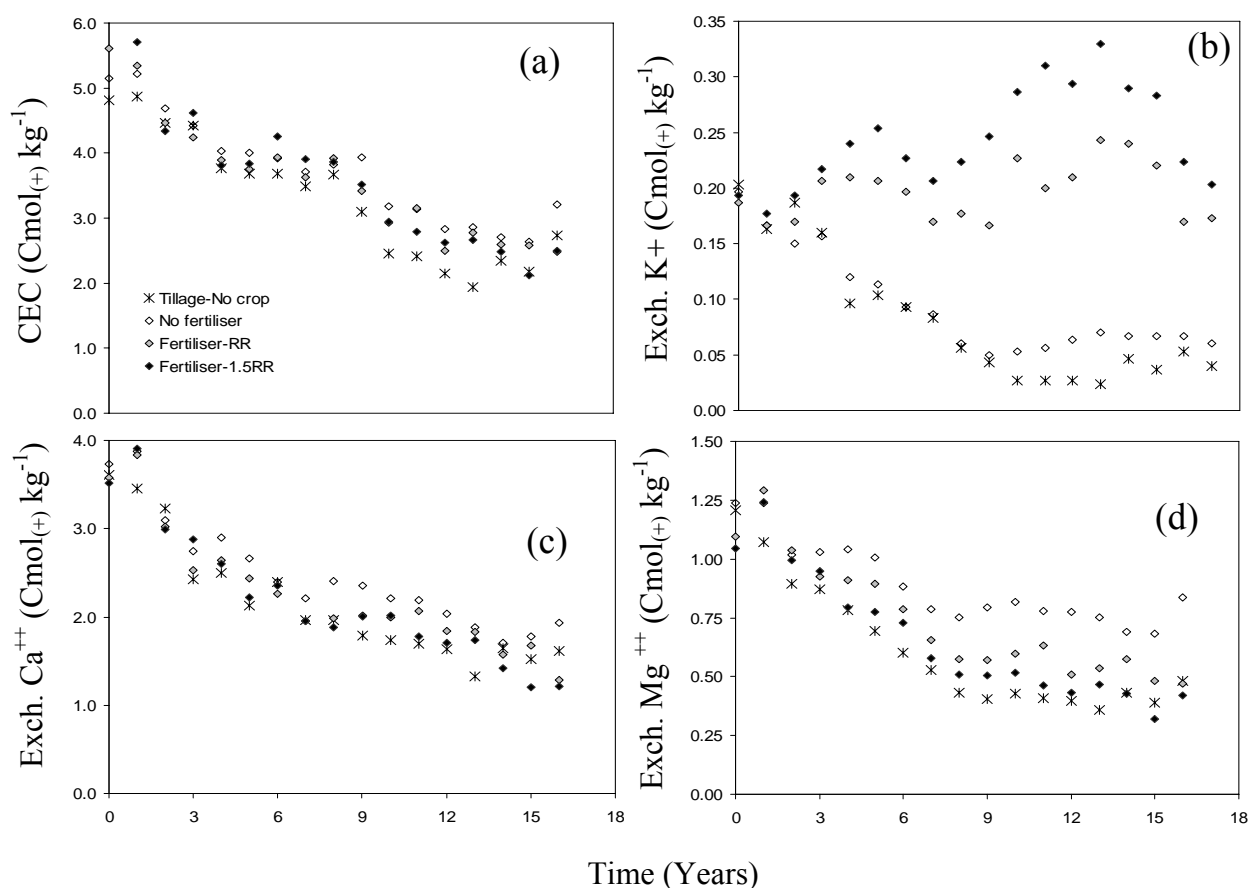


Figure 5: Long term changes in the cation exchange capacity (a) and exchangeable cations (b-d) under the four experimental treatments. Tillage-NoCrop: a control treatment in which the soil was tilled but no crop was sown; RR: recommended rates of N, P and K.; 1.5RR: recommended rates increased in 50%.

With RR and 1.5RR NPK fertilisation rates, the initial levels of soil exchangeable K (K_{exch}) were maintained or increased in the long-term (Fig. 5b), in stark contrast with the plots that did not receive fertilisers. These contrasting patterns induced an increasing K-saturation of the CEC in the long-term. The $K_{\text{exch}}/\text{CEC}$ ratio in RR and 1.5RR plots increased from 0.05 at plot clearing to an average of 0.10 at the end of the experiment. This saturation likely induced K loss by leaching, thus explaining why the K concentrations were only slightly higher for 1.5RR rate as compared to RR rate, despite the $42 \text{ kg ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ difference in K input between these two treatments. The importance of K leaching as the main process responsible for K loss is evidenced by the decline in K_{exch} in plots in which no crops were grown. Soil exchangeable Mg and Ca concentrations decreased gradually over the experimental period to 30-40% of their initial values at clearing (Fig. 5c and d). This decline was more substantial for Mg when crops received fertilisers, especially at 1.5 RR, or in plots without a crop. Contrary to K, a decrease in soil Mg and Ca concentrations was positively correlated with the CEC ($r = 0.65$ and 0.81 , respectively; $\alpha = 1\%$), of which they represented on average 20 and 60% respectively. The greater nutrient exports induced by NPK fertilisation (Table 3) were likely the main factors that determined variations in soil Mg and Ca concentration over time. K, Mg and Ca concentrations dropped more in plots without crops, indicating that these nutrients were also lost via leaching and/or erosion. The effect of fertiliser application on soil acidification may be partially reflected in the decline in Ca and Mg concentrations. A sum of Ca and Mg concentrations explained 39% ($p < 0.01$) of soil pH variations.

An analysis of the intra-annual variation in soil C and nutrient concentrations revealed that this was not season-specific (three samples were taken per year - cf. Section 2.2). However, there were often decreases between July (start of the second cropping season) and November (start of the dry season). For Tillage-NoCrop treatment, where C and mineral inputs to soil were assumed to be negligible, concentrations would sometimes increase slightly from one sampling to the next (not shown). Such an increase in total nutrient (N and P) concentrations indicate that the variability observed could be largely due to soil spatial micro-variability, which is often problematic in long-term agricultural trials, and to likely laboratory measurement error.

3.3 Modelling long-term changes in soil stocks and concentrations

The AMG model (Eqn. 2) accurately described the long-term decline in soil C stocks in the 20 cm topsoil layer, with a RMSE that represented 8% of the initial stock (Table 4).

Table 4: Calibrated parameter values of the AMG model (Eqn. 2) and of the single exponential decline (Eqn. 3) that optimised the fit between observed and simulated soil C and N stocks (t ha^{-1}) in the 0-20 cm topsoil layer

Treatment	Parameter				Equation fits	
	Y ₀	Y _{st}	K ₂ (year ⁻¹)	K ₁	RMSE (t ha ⁻¹)	r ²
<i>Soil organic C</i>						
Tillage-NoCrop	38.9	14.5	0.24	-	2.01	0.64
No-fertiliser	40.4	14.5	0.21	0.25		
Fertiliser-RR	39.7	15.0	0.22	0.25		
Fertiliser-1.5RR	39.2	15.0	0.22	0.25		
<i>Total soil N</i>						
Tillage-NoCrop	3.32	1.55	0.22	-	0.31	0.66
No-fertiliser	3.51	1.58	0.18	-		
Fertiliser-RR	3.51	1.58	0.16	-		
Fertiliser-1.5RR	3.56	1.59	0.11	-		

The stock of C at equilibrium was 37-38% of the initial stock; the apparent humification factor (K_1) was 25% and the life time of labile C in the order of 4 to 5 years. The somewhat similar values obtained for the decomposition rates (K_2) and the stock of soil C at equilibrium (Y_{st}) for all treatments indicate that the impact of mineral fertilisation and residue restitution on soil C at equilibrium was very low. Similarly, soil N stocks at equilibrium as simulated with Eqn. 3 did not differ between treatments. However, the rates of decline (K_2) in soil N decreased from Tillage-NoCrop, to No-fertiliser and to fertiliser treatments. These values of K_2 indicate that soil N stocks dropped faster without fertilisers than with them (life times of 9 vs. 5 years), but soil N stocks in the long-term were not improved by fertiliser application. These results were in line with the medium-term decrease in crop yields for unfertilised treatment (Figure 2). On average, annual soil N mineralized was 105 kg ha^{-1} as compared to the annual fertiliser inputs of $62\text{-}93 \text{ kg ha}^{-1}$, indicating that mineralisation was an important source of N available to crops. On average, the sum of N mineralized and N fertiliser was 103 , 172 and $183 \text{ kg ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ for No-fertiliser, Fertiliser-RR and Fertiliser-1.5RR treatments, respectively, and was higher with respect to crop N uptakes (Table 3). The differences ($20\text{-}27 \text{ kg N ha}^{-1}\text{year}^{-1}$) partially represented N lost from the 20 cm topsoil layer by erosion and/or leaching.

The decrease in available P and in exchangeable Ca and Mg for all treatments and in exchangeable K concentration for unfertilised treatments as described by Eqn. 3 resulted in Y_{st} values that corresponded to 11-25, 38-43, 34-52 and 17-25% of total initial concentrations, respectively (Table 5). These proportions may represent for K, Mg and Ca, the levels of concentrations of these nutrients in exchangeable pool that balanced with the non-exchangeable pool and with their uptake by crops (cf. the stabilisation of crop yields towards the end of the experiments).

Table 5: Calibrated parameter values of the single exponential decline (Eqn. 3) that optimised the fit between observed and simulated nutrient concentrations in the 0-20 cm topsoil layer

Treatment	Parameter			Equation fits	
	*Y ₀	*Y _{st}	K ₂ (year ⁻¹)	RMSE (*)	r ²
<i>Available P (mg kg⁻¹)</i>					
Tillage-NoCrop	133	25	0.60	7.2	0.64
No-fertilizer	124	14	0.54		
Fertilizer-RR	121	25	0.98		
Fertilizer-1.5RR	121	31	1.01		
<i>Exchangeable K+ (cmol₍₊₎ kg⁻¹)</i>					
Tillage-NoCrop	0.20	0.035	0.20	0.01	0.90
No-fertilizer	0.20	0.050	0.18		
<i>Exchangeable Ca++ (cmol₍₊₎ kg⁻¹)</i>					
Tillage-NoCrop	3.45	1.50	0.22	0.19	0.92
No-fertilizer	3.88	1.65	0.19		
Fertilizer-RR	3.84	1.57	0.23		
Fertilizer-1.5RR	3.91	1.50	0.24		
<i>Exchangeable Mg++ (cmol₍₊₎ kg⁻¹)</i>					
Tillage-NoCrop	1.07	0.37	0.23	0.05	0.95
No-fertilizer	1.24	0.65	0.18		
Fertilizer-RR	1.29	0.45	0.21		
Fertilizer-1.5RR	1.24	0.42	0.26		

*In their respective units

Annual rates of decline in exchangeable Mg and Ca concentrations under NPK fertilised crops were 1.2- to 1.4-fold higher than those under unfertilised crops. Exchangeable cations concentrations at equilibrium lead to ratios of $Y_{st}(Mg)/Y_{st}(K)$ and $[Y_{st}(Mg) + Y_{st}(Ca)]/Y_{st}(K)$ of 2.2 and 10.1, respectively, for Fertiliser-RR treatment and 1.7 and 7.7 for Fertiliser-1.5RR treatment, whereas in the initial state these ratios were around 6 and 25 for all treatments. NPK fertilisation thus tended to keep the exchangeable cations balances below optimal. For

No-Fertiliser treatment, $Y_{st}(Mg)/Y_{st}(K)$ was 13 and showed an optimal balance between Mg and K after 20 years of cropping without NPK fertiliser application - the $[Y_{st}(Mg) + Y_{st}(Ca)] / Y_{st}(K)$ ratio was 46 and slightly higher than the optimal values.

3.4 Modelling potential soil nutrient supply and crop responses

The soil supply of N, P and K was calculated using QUEFTS; their average values are shown for the first five years of the experiment (immediately after natural vegetation clearance) and for the subsequent period in Table 6. The supply of soil N (SN) calculated with the original equation (Eqn.4) tended to be higher than N uptakes calculated from average N contents and total crop biomass produced in unfertilised plots. SN calculated with the modified equation (Eqn.7) and SP and SK values calculated with original equations were closer to the average N, P and K uptakes estimated for maize (cf. Tables 3 and 6). The potential supply of native N and P by this Ferralsol under continuous cultivation dropped in the long-term by 38-49 and 24-59% with respect to the initial 5 years, respectively, with little difference between treatments (Table 6). In contrast, soil potential to supply K increased by 67 and 80% for Fertiliser-RR and Fertiliser-1.5RR treatments, respectively and decreased by 12% for No-Fertiliser treatment. Decline in potential soil N supply was a consequence of the drop in soil C and N contents (Eqn.4). The decline in potential soil P supply, despite the slight decline in soil P content, was induced by a decrease in soil pH and C content (Eqn.5). Such declines in soil pH and C content, associated with the steady exchangeable K concentrations, explained an increase in soil K supply for fertilised treatments (cf. Eqn. 4).

Table 6: Average potential soil N, P and K supply (SN, SP, SK, respectively, in $kg\ ha^{-1}$) as calculated with QUEFTS for the first five years and for the rest of the experiment

Period	Tillage-NoCrop			No-Fertiliser			Fertiliser-RR			Fertiliser-1.5RR		
	SN	SP	SK	SN	SP	SK	SN	SP	SK	SN	SP	SK
First 5 years	74 ±28	27 ±12	47 ±3	74 ±26	24 ±13	49 ±4	75 ±26	22 ±8	44 ±18	84 ±28	24 ±10	48 ±23
Subsequent	38 ±6	14 ±3	41 ±2	45 ±7	10 ±2	43 ±2	46 ±8	11 ±4	74 ±12	48 ±7	18 ±5	87 ±11

The QUEFTS model simulated maize yields rather accurately for the medium- and long-term, especially for treatments with fertiliser application (RMSE = $0.47\ t\ ha^{-1}$ of maize grain) (Fig. 6a). QUEFTS tended to overestimate the maize yields that could be obtained without fertilisers towards the end of the experiment. Yields simulated for the first 5 years of the

experiment were higher than observed yields and correspond to the experiment phase in which soil C contents were higher than 12 g kg^{-1} (Fig. 6b).

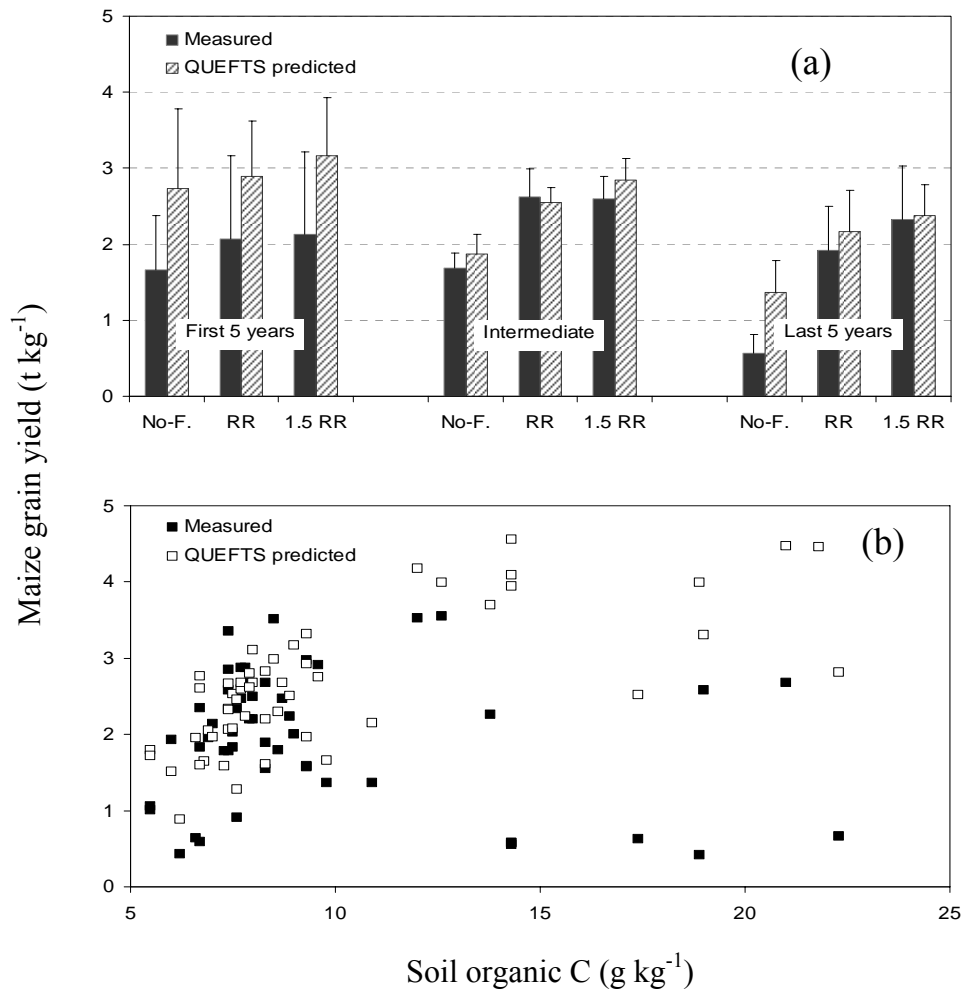


Figure 6: A comparison of measured and predicted yields of maize using the model QUEFTS, for three treatments (Control without fertiliser [No-F], NPK fertiliser applied at recommended rates [RR] or at this rate increased in 50% [1.5RR]), averaged for the first five, intermediate, and last five years of the experiment (a). All measured and predicted yields, irrespective of treatment, plotted against soil organic carbon (b).

The best fit between simulated and observed yields was obtained when the fractions of fertiliser N, P and K taken up by maize, or recovery efficiencies, were at 30, 10 and 40%, respectively. Minimum N, P and K uptake values were steady at 7, 0.4 and 2 kg ha⁻¹, respectively, and Y_{\max} at 9 t ha⁻¹ of maize grain. The sensitivity of the model was studied for the effects of varying fertiliser application rates or soil pH on maize yields (considering only the intermediate and final experimental periods, during which simulations were more

accurate). A 10% decline in soil pH would induce, according to QUEFTS, a decrease of 16-20% in maize yield over the medium- and long-term. In contrast, 10% variations in P or K application rates had very little impact on simulated maize yields (Table 7).

Table 7: Partial relative sensitivities of predicted maize yields to 10% changes in N, P or K application rates and soil pH

Period	$*RR_{PK}/-10\%RR_N$		$RR_{NK}/-10\%RR_P$		$RR_{NP}/-10\%RR_K$		Soil pH	
	-10%N	10%N	-10%P	10%P	-10%K	10%K	-10%pH	10%pH
Intermediate years	-1.76	1.73	-0.08	0.08	-0.18	0.18	-16.21	11.36
Last five years	-2.72	2.69	-0.03	0.04	-0.04	0.04	-20.27	17.8

(*) P and K were maintained at recommended rate and the recommended rate of N was increased or decreased in 10%

The model thus calibrated and tested was used to explore the long-term impact of the four experimental treatments on soil basal productivity and responsiveness. The indicator used was the simulated response by maize to increasing application rates of fertiliser N, with constant P and K rates, on plots that were subject to the four experimental treatments during 2, 7, 12 or 17 years.

The response to increasing doses of N (in the presence of recommended rates of P and K) was poor after only 2 years since natural vegetation clearance (1973), as good yields could still be attained without fertilisers (Figure 7; cf. Figure 2). Predicted maize yields were 1 t ha⁻¹ lower in plots that were cropped to maize and cotton for two years than in plots that were tilled but not planted. No-fertiliser plots exhibited the steepest response to applied N at this moment. Five years later (1978), yields without fertilisers dropped in all treatments plots to less than half their value in 1973, but maize response to applied N was still good, particularly in plots that received fertiliser since the onset of the experiment. The same is true for the year 1983 (12 years since plot clearance), except that responses start to flatten in plots that did not receive fertilisers. The explorations for 1988 suggest that a suspension of N application in plots which were fertilised during the last 17 years would yield no more than 1 t ha⁻¹ of maize grain (Figure 7 – RR and 1.5RR plots). These are virtually the same yields that would be obtained with no N in plots that did not receive any fertiliser during 17 years. Applying N in plots which were not previously fertilised would induce less maize response to fertilisation, as compared to crop response in plots that were previously fertilised. These results indicate that the long-term impact of continuous fertiliser use manifest more in the responsiveness of the soil to applied N than in the basal productivity without fertilisers.

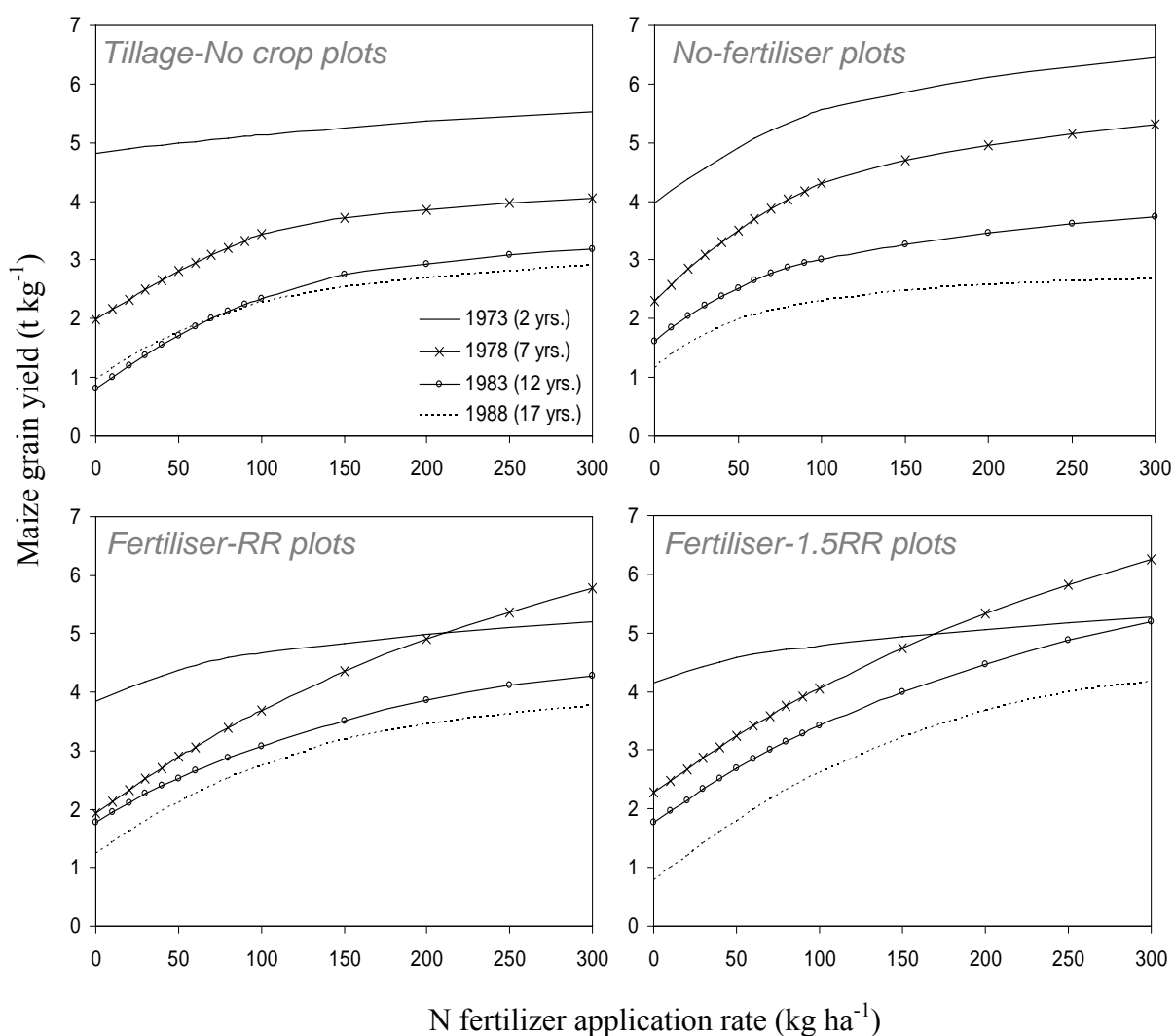


Figure 7: Simulation with the model QUEFTS of the response of maize to increasing rates of N in the presence of recommended rates of P and K in plots that underwent different fertiliser regimes during 2, 7, 12 and 17 years (Control without a crop [Tillage-NoCrop]; control without fertiliser [No-Fertiliser], NPK fertiliser applied at recommended rates [Fertiliser-RR] or at this rate increased in 50% [Fertiliser-1.5RR]).

4. Discussion

The results of our study indicate that crop productivity cannot be sustained for long time in the *terre de barre* of southern Togo without nutrient inputs. While loss of productivity without fertilisers was almost immediate for cotton, it was less pronounced for maize, with substantial responses to applied fertilisers only after 10 years of continuous cultivation (cf. Figure 2). Mineral fertilisers applied at the recommended rate produced virtually the same yields as when this rate was increased by 50%. However, fertiliser application and crop

residue restitution to soil did not prevent the rapid decline in soil C, N, pH and exchangeable bases except for K and for total P. The stocks of C and N in plots that were tilled but not planted nor fertilised – hence, for which C and N inputs were nil – were only slightly lower than in plots that received such inputs via crop residues, fertilised or not (cf. Figure 4A and B and Table 4). Increasing the fertiliser application rate by 50% led to somewhat higher P and K availability than the recommended rate towards the end of the experiment, but also to faster depletion of nutrients that were not incorporated in fertiliser's formulation. This led in turn to misbalances in the equilibrium concentrations of exchangeable cations, and to high K saturation of the exchange capacity. At the end of the experiment, after about two decades of continuous cultivation with or without fertilisers, the capacity of this Ferralsol to provide nutrients to a maize crop was very poor; with associated intercept yields of about 1 t ha^{-1} (cf. Figure 7).

The Tillage-NoCrop treatment represents virtually the maximum possible impact of tillage on soil organic matter and nutrient dynamics when C and nutrient inputs are absent, certainly aggravated by double annual cropping. The long-term effect of tillage on soil C and N contents was not compensated by crop residue restitution to the soil. The final stocks of these elements did not differ much between treatments. This suggests that continuous tillage - and not residue removal - is the major factor determining C and nutrient losses from these tropical soils. Soil C declined even when maize stover was left in the plots, and this decline was not affected by the increase in C inputs via fertilisation (Fig. 4A). Kumar et al. (1999) and Norman et al. (2003) showed for other cultivated tropical soils similar declines in soil C induced primarily by high mineralization resulting from soil climate changes induced by clearing and tillage rather than by the quantity or quality of C returned to the soil. Tillage destroys soil aggregates, thus increasing the vulnerability of soil C to degradation and increasing aeration, with highly contrasting soil moistening and drying phases (Balesdent et al., 2000; Al-Kaisi et al., 2005). These phenomena, associated with high tropical temperatures and sparse soil cover lead to a marked decrease in soil C.

Mando et al. (2005) and Kapkiyai et al. (1999) reported a decrease in soil C and an absence of effect of fertilisation on soil C patterns under different cropping systems in Africa. Our results differed, however, from those reported by Kanchikerimath et al. (2001), who observed a positive effect of NPK fertilisation on soil C patterns, and from those of Bationo and Buerkert (2001), who reported in a study carried out in the Sahel that soil C was maintained by leaving the cereal crop residue in the fields. The rates of soil C and N decline calculated in the present

study were high and comparable to those reported elsewhere in the sub-region (e.g. Bostick et al., 2007; Kintché et al., 2010). The large fractions of resistant C and N in soil, as assumed in the parameters of the respective models, reflect the fragility of these tropical soils. Years of intense bush fires, which enhance the soil in charcoal, often explained the hard to mineralize C fractions that prevail in West Africa (Pieri, 1989).

The low response of cotton and maize crops to the increased NPK fertilisation rate noted in the present study could be explained by the chronic water shortage under this kind of rain-fed agriculture system (Pandey et al., 2001). Crop yields for the mineral fertilisation treatments sharply dropped during dry years, contrary to the unfertilised treatment (Figure 2). Since fertilised plants have greater leaf growth, photosynthesis is markedly reduced under water stress conditions (Evans et al., 1975). Another reason for low response of crops to the high fertilisation rate was the proportional increase in the doses of all minerals that did not change the balance between the applied minerals relative to that of the recommended dose (Van Keulen et al., 1982; Summer and Farina, 1986). The medium- and long-term assessments with the QUEFTS model revealed that high rates of N applications (with P and K at the recommended rate) would enhance crop yields comparable to the minor improvements obtained when all minerals are increased proportionally (Table 6). Although crop responses to mineral fertilisers were rainfall-dependent (Figure 3), QUEFTS considered only soil parameters (C, pH and nutrient pools) and added fertilisers as yield determinants, and overestimated maize yields during the first years of the experiment. This could be explained by the high soil C content during this period, as QUEFTS is highly sensitive to soil C variations (Smaling et al., 1993). The QUEFTS model parameterisation suggests that only a small fraction of applied N is taken up by maize, suggesting that residual nitrogen (around 70%) was lost by leaching/volatilisation (Kumar et al., 2002). Moreover, the application of high N doses increases N concentrations by almost twofold in cotton stems (Abad et al., 2004). Burning uprooted cotton plants after harvest to reduce parasite pressure was found to result in loss of these high N quantities taken up by cotton plants, while also causing soil N loss by volatilization due to the heat generated (Raison et al., 1993).

Most nutrients restored to the soil in this region of Africa are N, P and K, and to a lesser extent sulphur and boron in cotton fields. Magnesium and calcium are almost completely absent in applied fertiliser formulations. About 20 years ago Pieri (1992) warned that high application rates of mineral fertilisers without organic matter amendments can lead to imbalanced soil nutrient fertility restoration, and could give rise to problems that are hard to

solve. For instance, the intensification of cereal crop production with application of imbalanced fertiliser combinations led to K and Mg deficiencies in Southeast Asian countries (Jiyun et al., 1999; Dobermann et al., 1996a; Ladha et al., 2003). Cases of high soil acidification after heavy mineral fertiliser applications have been reported in South Africa (Haynes et al., 1993). The inclusion of Mg and Ca in the recommended NPK formulation after the first 5 years of cropping in Ferralsol would be an effective way to sustain crop productivity. First, it would help maintain an optimal soil exchangeable base balance, while reducing the 1.2- to 1.4-fold greater decreases in Mg and Ca concentrations induced by NPK fertilisation.

The addition of Mg and Ca to the recommended NPK formulation would contribute to regulating soil pH ($r^2 = 0.39$) which, as the simulations indicated, would have a marked impact on maize yields (Table 7; Smaling et al., 1993). The positive effect of improving soil pH on the maize yield noted could be explained by the improvement in the soil P supply potential to benefit the crops. In soils that are too acidic ($\text{pH} < 4.5$), phosphorus is mainly present in H_3PO_4 form, which is not soluble enough in the soil solution to be taken up by crops (Nyle et al., 2008). These results highlight the lack of information provided by the Olsen method on crop phosphate nutrition. As this method mainly focuses on the level of P associated with C and Al (Dabin, 1968), and due to the soil acidification conditions (high Al concentration), it revealed a high available soil P after the first 10 years of the experiment (Figure 4C, Manske et al., 2001). This phosphorus is, however, barely involved in plant nutrition.

In contrast to exchangeable cations, a decline of P concentrations was less marked in plots without crops than in unfertilised crop plots, indicating that exportation via harvest was the main factor responsible for long-term soil P variations. These results indicate that in this soil type, the partial mineral balance is only a good indicator of long-term P dynamics. Due to high losses of other nutrients not linked with crop yields, this balance does not accurately account for their observed concentration patterns. Thus, while soil P patterns were mainly explained by crop nutrient exports, losses by decomposition, soil erosion or leaching substantially altered the soil concentrations of other nutrients. The insignificant P leaching losses resulted in high sequestration of this nutrient in soil particles and its potential to form rigid bonds with iron molecules (Dabin, 1968), i.e. one of the main Ferralsol constituents. Especially for K, leaching losses were marked while fertilisers were applied, due to the long-term decline in CEC. Burns and Barber (1961) and Zeng and Brown (2000) reported high K

losses by leaching when high quantities were applied in a single treatment, as was the case in the present study. Xiaokun et al. (2009) explained the K leaching noted after high mineral fertilisation by the effect of N inputs on the different K compartments. In soils with a low CEC, NH_4^+ ions introduced by N fertilisation could substitute K^+ ions barely fixed on the adsorbent complex, thus boosting the K concentration in the soil solution and leading to leaching loss, especially under crops with a non-dense root system.

5. Conclusions

The Abuja meeting of African head of states in 2006 set the goal of increasing the average fertiliser use in the continent up to 50 kg ha^{-1} , and charged the African Green Revolution Alliance with the task of facilitating this (www.agra-alliance.org). Although mineral fertilisers were essential to sustain crop productivity in the long-term (i.e., after about 5 years of continuous cultivation), continuous fertiliser application did not result in substantially larger soil C and nutrient stocks as compared with non-fertilised soils, except for exchangeable K. The notion that soil C stocks can be maintained through mineral fertiliser use and crop residue restitution to cultivated soils is not supported by the results of this study. Crop productivity in the long-term remained relatively low even when fertilisers were used (about 2 t ha^{-1} of maize grain per season). Optimal mineral fertiliser application rates should take environmental and economic imperatives into account. The results of the present study concluded no interest in mineral inputs increasing above the recommended application rates—especially P and K. Fertiliser use led to faster depletion of soils stocks of nutrients that were not applied in fertilisers, indicating a need to carefully design mineral fertiliser formulations. As the recommended NPK fertilisation rate does not guarantee the sustainability of the production system, additional complementary Mg and Ca inputs are required after a few years of cropping in Ferralsol. Other alternatives not tested here, such as liming or minimum tillage, might contribute to greater efficiency of fertiliser use in the long-term. From our simulations of crop responses to applied fertilisers in soils that underwent different fertiliser regimes during two decades, we may conclude that the long-term impact of continuous fertiliser use manifest more in the responsiveness of the soil to applied N than in the basal soil productivity without fertilisers; i.e., soils that did not receive fertilisers became non-responsive to fertilisers over time.

Acknowledgement

The authors wish to acknowledge the *Service de Coopération des Affaires Culturels* of the French Embassy at Togo for financing this research, Dr. K. A. Agbobli of the *Institut Togolais de Recherche Agronomique* (ITRA) for his initiative and Dr. F. Maraux of *CIRAD-Persyst-URSCA* for his accompaniment.

Chapitre 5

Effet de la jachère de courte durée sur l'évolution des concentrations du sol en carbone et nutriments

1. Introduction

Dans les savanes d'Afrique sub-saharienne où l'agriculture est caractérisée par des apports faibles de minéraux et d'amendements organiques, la pratique de la jachère naturelle est l'une des méthodes traditionnelles de restauration de la fertilité des sols cultivés. Conduite sur une période relativement longue, elle assure la stabilité structurale du sol à travers le système racinaire particulièrement dense de graminées, stimule des restitutions organiques et l'activité microbienne et préserve ou améliore le stock minéral du sol en réduisant le ruissellement et la lixiviation (Nye et *al.*, 1960 ; Morel et *al.*, 1972). Depuis plusieurs années, le recours à la jachère de longue durée a fortement diminué en raison de l'explosion démographique qui s'est traduite par la pression tant sur le foncier que sur les ressources ligneuses et herbacées (Harmand et *al.*, 1998 ; Masse et *al.*, 1998). Les jachères améliorées avec des essences fertilisantes (légumineuses) ont été proposées pour suppléer à cette contrainte de temps liée aux jachères naturelles de longue durée (Louppe et *al.*, 1998).

Notre objectif dans ce chapitre a été d'analyser l'effet sur l'évolution des indicateurs de la fertilité du sol de la présence dans la rotation culturale de deux ou trois années consécutives de jachère avec et sans fertilisation minérale.

2. Matériel et méthode

2.1. Site expérimental

L'essai a été conduit sur le point de recherche de Toaga, dont les conditions climatiques et les caractéristiques agronomiques du sol à la défriche ont été présentées au chapitre 2.

2.2. Dispositif expérimental

L'essai a été conduit de 1967 à 2003 pour étudier l'effet de la jachère de courte durée sur les rendements de culture et sur l'évolution des indicateurs de la fertilité du sol. Les traitements testés ont été : (i) la culture continue du sol dans la rotation triennale arachide/coton/sorgho avec fertilisation minérale (CC-AF) et sans fertilisation (CC-SF), (ii) l'alternance à la rotation

arachide/coton/sorgho de deux années consécutives de jachère naturelle avec (2JN-AF) et sans (2JN-SF) fertilisation minérale et (iii) l'alternance à cette rotation culturale de trois années consécutives de jachère naturelle avec (3JN-AF) et sans (3JN-SF) fertilisation minérale. Les traitements ont été installés sur des parcelles élémentaires de 300 m² et en quatre séries (I, II, III et IV). Les séries diffèrent par la nature de cultures venant en rotation chaque année, même pour un même traitement (Table 1A). Entre 2004 à 2008, toutes les parcelles ont été exploitées en monoculture de sorgho.

Table 1 : Traitements et succession culturale (A), apport de fertilisants minéraux et gestion des résidus de récolte (B), essai durée de jachère de Toaga

A Années/ période	Rotations culturales											
	Série I			Série II			Série III			Série IV		
	CC-AF CC-SF	2JN-AF 2JN-SF	3JN-AF 3JN-SF	CC-AF CC-SF	2JN-AF 2JN-SF	3JN-AF 3JN-SF	CC-AF CC-SF	2JN-AF 2JN-SF	3JN-AF 3JN-SF	CC-AF CC-SF	2JN-AF 2JN-SF	3JN-AF 3JN-SF
1967			A			A						
1968		A	C			A						
1969	S	C	S	C		C	A		A	S		
1970	A	S	J-1	S	A	S	C	A	C	A		
1971	C	J-1	J-2	A	C	J-1	S	C	S	C	A	
1972	S	J-2	J-3	C	S	J-2	A	S	J-1	S	C	A
1973	A	A	A	S	J-1	J-3	C	J-1	J-2	A	S	C
1974	C	C	C	A	J-2	A	S	J-2	J-3	C	J-1	S
1975	S	S	S	C	A	C	A	A	A	S	J-2	J-1
1976	A	J-1	J-1	S	C	S	C	C	C	A	A	J-2
1977	C	J-2	J-2	A	S	J-1	S	S	S	C	C	J-3
.												.
.												.
2003												2003
2004 à 2008	Monoculture de sorgho											

B Période	Apport de fertilisants minéraux (kg ha ⁻¹)*						Gestion résidus de récolte
	Coton	Sorgho	Arachide	Jachère /année1	Jachère/année2	Jachère/Année3	
	N-P-K-S-B	N	N-P-K-S	N-P-K-S	N-P-K-S	N-P-K-S	
1967-1969	20-21-0-10-0	n.f	n.f	n.f	n.f	n.f	
1870	50-21-25-5-0,4	n.f	n.f	n.f	n.f	n.f	
1971-1977	50-21-25-5-0,4	n.f	0-16-0-0	n.f	n.f	n.f	Tiges de cotonnier
1978-1979	50-21-25-5-0,4	n.f	0-16-0-0	n.f	n.f	n.f	arrachées et brûlées,
1980-1983	30-22-67-11-1	46	0-22-42-7	46-63-22-7	46-0-22-7	46-0-22-7	tiges de céréales et
1984-1988	30-24-67-12-1	46	0-22-42-7	46-63-22-7	46-63-22-7	46-0-22-7	fanés de légumineuses
1989	24-19-62-11-1	46	0-22-42-7	46-63-22-7	46-63-22-7	46-0-22-7	laissées sur la parcelle,
1990	30-24-67-12-1	46	0-22-42-7	46-63-22-7	46-63-22-7	46-0-22-7	jachère non brûlée
1991-2003	24-19-61-22-1	46	0-21-40-18	46-63-22-18	46-63-22-7	46-0-22-7	
2004-2008	Non cultivé	n.f	Non cultivé		Non pratiquée		Brûlés

*Traitements CC-AF, 2AJ-AF et 3AJ-AF ; n.f signifie que la culture ou jachère n'a pas été fertilisée.

De 1967 à 1970, seul le cotonnier avait été fertilisé (Table 1B). Entre 1971 et 1979, en plus du cotonnier, l'arachide avait été fertilisée. De 1980 à 2003, toutes les cultures ainsi que les

jachères ont été fertilisées. En monoculture de sorgho entre 2004 et 2008, les parcelles n'avaient pas été fertilisées. Pour le cotonnier et le sorgho, l'azote a été apporté en deux temps : 30 et 15 kg ha⁻¹ respectivement au 20^{ème} jour après le semis, 23 et 39 kg ha⁻¹ au 40^{ème} jour. P et K ont été apportés en une fois et en même temps que le premier apport de N. Les engrais minéraux ont été apportés avant le labour pour l'arachide et en mai pour les jachères. Durant les 41 ans d'expérimentation, les quantités totales de N et P apportées à travers la fertilisation ont été respectivement de 724 kg ha⁻¹ et 444 kg ha⁻¹ en culture continue et sont plus faibles que celles apportées pour les traitements incluant la jachère : 863 et 893 kg N ha⁻¹ et 791 et 666 kg P ha⁻¹ pour deux et trois années de jachère respectivement. Les quantités totales apportées de K en culture continue ont été de 892 kg ha⁻¹ et sont en revanche plus élevées que celles de 735 et 693 kg ha⁻¹ apportées respectivement pour les traitements avec deux et trois années de jachère.

De 1967 à 2003, seules les tiges de cotonnier ont été arrachées puis brûlées. Les tiges de sorgho et la fane d'arachide ont été laissées sur la parcelle expérimentale. Un mois avant la fin de la saison des pluies, les herbes de la jachère ont été rabattues sans être brûlées. De 2004 à 2008, toute la parcelle expérimentale a été brûlée chaque année. Pour tous les traitements, les échantillons de sol ont été prélevés en 1967 (après la défriche) et en 1978. Ils ont été repris en 1983 et 1989 pour les traitements des séries I et IV, en 1979, 1983, 1984 et 1990 pour ceux de la série II et en 1981, 1982 et 1991 pour ceux de la série III. En 2008, nous avons revisité la parcelle et prélevé de nouveaux échantillons de sol sur chacune des 24 parcelles élémentaires. Quinze sondages de sol, suivant une diagonale de chaque parcelle élémentaire, ont été effectués sur les profondeurs 0-20 et 20-40 cm et des échantillons composites par traitement ont été constitués. Les concentrations de C et de nutriments, le pH et la CEC ont été déterminées selon les méthodes classiques décrites au chapitre 2.

2.3. Analyse des données.

Les données interprétées ici sont les rendements de cultures, la concentration de C et celles des nutriments dans les 20 premiers centimètres du sol ; la profondeur sous jacente étant en général peu influencée par des pratiques culturales en agriculture manuelle (Siband, 1972 ; Groot et *al.*, 1998a). La potentialité des différents traitements à préserver la fertilité minérale du sol a été analysée en couplant le bilan minéral apparent tel que décrit au chapitre 4 à l'évolution observée des concentrations minérales dans le sol.

L'évolution du stock de C a été simulée en utilisant le modèle AMG. Le paramétrage du modèle et le calcul de C retournant au sol à travers les résidus de récolte ont été effectués selon la méthode décrite au chapitre 3. Les quantités annuelles de C, retournant au sol à travers la paille produite en jachère, ont été estimées à partir de données collectées dans la littérature et d'un ratio p_t calculé à partir des rendements de cultures. Ce ratio qui intègre indirectement dans l'estimation de la biomasse produite l'effet de la pluviométrie et du niveau de fertilité du sol à l'année expérimentale considérée est calculé de la façon suivante : $p_t = M_{ct}/M_{co}$, où M_{ct} est le rendement des cultures à l'année t de l'expérimentation et M_{co} la moyenne des rendements obtenus durant toute la période expérimentale. Des valeurs de p_t qui par exemple sont supérieures à 1, supposent que la pluviométrie et le niveau de fertilité du sol à l'année correspondante ont permis des productions de cultures plus élevées que celles qui sont en moyenne obtenues. En admettant que la pluviométrie et le niveau de fertilité du sol influent de la même manière les mauvaises herbes que les cultures, la paille produite²² à l'année t en jachère (M_{jt}) a été obtenue par la relation $M_{jt} = p_t * M_{j0}$, où M_{j0} est la quantité moyenne théorique de paille susceptible d'être produite en jachère sur ces types de sols. M_{j0} a été considéré égal aux valeurs moyennes rapportées par Groot et *al.* (1998b) en zone soudano-sahélienne : 3,8 t ha⁻¹ an⁻¹ de pailles sèches (PS) en jachère non-fertilisée et multipliée par 1,4 lorsque la jachère est fertilisée (5,3 t PS ha⁻¹ an⁻¹). La biomasse racinaire produite dans les 20 premiers cm du sol a été considérée égale à 40% de PS (Penning et *al.*, 1982 ; Traoré, 1995). La quantité de C contenu dans chaque biomasse a été calculée en admettant une teneur en C de 42% (Morel et *al.*, 1981). Le modèle a été paramétré en considérant la quantité de C ainsi estimée à l'année t comme l'entrée de C au sol à l'année $t+1$.

La version paramétrée du modèle a été utilisée pour calculer les apports externes de C (amendements) qui permettraient de maintenir/restaurer le stock de C du sol aux niveaux ayant optimisé la réponse des cultures à la fertilisation minérale. Les quantités explorées varient entre 0 et 3,5 t C ha⁻¹ an⁻¹. L'effet de ces apports externes de C a été analysé à différents âges de mise en culture de la parcelle : à la défriche et à la fin de l'expérimentation. A cet effet, l'accumulation de C dans le sol (Acc) a été calculée par la relation : $Acc = (Q_N - Q_0)/n$, où Q_N est le stock d'équilibre de C exploré en admettant l'apport externe d'une quantité Q de C; Q_0 est le stock de C observé à l'équilibre lorsque aucun apport externe n'a été supposé et n le nombre d'années que dureraient les apports externes avant que le équilibre Q_N soit atteint. Enfin, l'intérêt de fractionner ou non les apports externes d'une

²² Les quantités de biomasse en jachère varient donc d'année en année en raison du ratio p_t qui varie

quantité Q de C a été analysé à travers le rendement des apports (R_Q) : $R_Q = Acc/Q$. Le ratio R_Q mesure donc la fraction des apports qui s'accumulerait dans le sol.

3. Résultats

3.1. Effet de la jachère de courte durée sur les rendements de culture

Les rendements du cotonnier, du sorgho et de l'arachide ont été peu différents en culture continue et lorsque 2 ou 3 années consécutives de jachère ont été alternées à la rotation triennale arachide/coton/sorgho (Fig.1a-f). En revanche, la fertilisation minérale a amélioré les rendements de cultures (Fig. 1b, d et f).

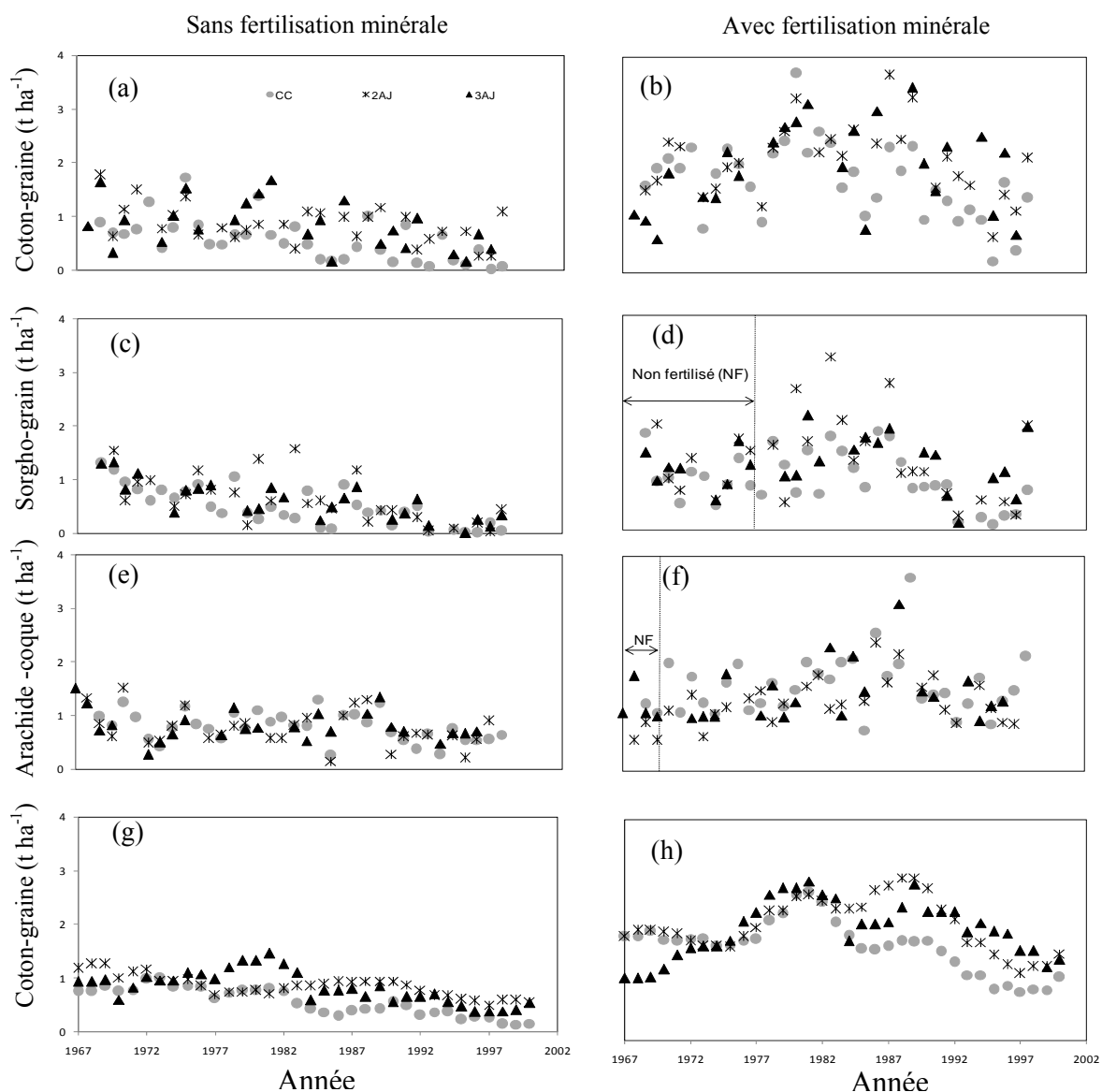


Figure 1 : évolution des rendements de coton (a et b), de sorgho (c et d) et d'arachide (e et f) et des moyennes mobiles de 5 années consécutives de rendements de coton-graine (g et h). CC = culture continue, 2AJ = deux années de jachère et 3AJ = trois années de jachère.

Lorsque les fertilisants minéraux ont été apportés, les rendements respectifs de coton-graine, de sorgho-grain et d'arachide-coque ont varié de 0,2 à 3,7, de 0,1 à 3,2 et de 0,6 à 3,6 t ha⁻¹. En absence d'apports minéraux, les productions de coton et de sorgho ont été parfois nulles dans le long terme (Fig. 1a et c). Comme dans le cas de l'expérimentation conduite à Kouvé en terre de barre (chapitre 4), le cotonnier tend à mieux répondre à la fertilisation minérale que le sorgho et l'arachide. Par rapport aux traitements sans fertilisation minérale, les productions respectives de coton-graine, de sorgho et d'arachide ont été en moyenne accrues de 1,2, 0,7 et 0,8 t ha⁻¹ lorsque la fertilisation minérale a été effectuée. Après les 12 premières années où toutes les cultures ainsi que les jachères avaient été fertilisées, la réponse des cultures à la fertilisation minérale a été nettement améliorée avant de se détériorer après 1995 (Fig. 1b, d et f).

L'évolution dans le temps des rendements de cultures montrent en général une baisse, avec cependant une légère stabilité pour les traitements alternant la jachère à la rotation culturale (Fig. 1g et h). Pour les traitements alternant la jachère et en absence d'apports minéraux, les moyennes mobiles de 5 années consécutives de rendements de coton-graine tendent à être maintenues au dessus 0,5 t ha⁻¹ après 1985, tandis qu'elles restent en dessous de cette valeur en culture continue. De la même manière, lorsque les engrais minéraux ont été apportés, ces moyennes mobiles de coton-graine sont plus élevées pour les traitements incluant la jachère qu'en culture continue. Les moyennes mobiles des rendements de sorgho-grain et dans une très moindre mesure celles de l'arachide-coque montrent une tendance analogue à celles de coton-graine.

Parce que les rendements annuels de cultures ont été peu différents tant en culture continue qu'en présence de la jachère, la fréquence²³ des récoltes en culture continue a induit des productions totales de coton-graine, de sorgho-grain et d'arachide-coque plus élevées (Table 2). Même, en absence d'apports minéraux, la production cumulée d'arachide en culture continue a été comparable à celles des traitements avec jachère et fertilisation minérale. Ces niveaux de productions, associés aux modes de gestion des résidus de récolte, ont induit en culture continue des exportations minérales plus élevées alors que les apports de N et P à travers la fertilisation ont été faibles pour ce traitement (cf. section 2.2). Il en a résulté sur les parcelles fertilisées, un bilan apparent N fortement négatif en culture continue contrairement aux traitements avec jachère et un bilan apparent P plus faiblement positif en culture continue

²³ Récolte tous les ans en culture continue, contre 3 années sur 5 avec deux de jachère et 2 années sur 5 avec trois années de jachère.

que pour les traitements avec jachère fertilisée (Table 2). Sur les parcelles non-fertilisées, le bilan apparent N a été aussi fortement négatif et celui de P l'est faiblement ; avec de faibles différences entre culture continue et en présence de la jachère. Le bilan K est positif sur les parcelles fertilisées et négatif sur celles non-fertilisées, sans montrer également de différences entre culture continue et en présence de la jachère. Les quantités de C retournant au sol (M) ont été plus élevées pour les traitements incluant la jachère qu'en culture continue. En culture continue et avec apports minéraux, les entrées moyennes annuelles de C au sol ne représentent que 40 à 48% de celles des traitements incluant la jachère avec fertilisation minérale et 58 à 72% de celles des traitements incluant la jachère sans fertilisation minérale (Table 2).

Table 2 : Productions totales, exportations minérales à travers les récoltes, bilan minéral apparent et quantités de carbone retournant au sol durant toute la période expérimentale

Traitement	Cumul production (t ha ⁻¹)			Cumul exportations minérales induites par les récoltes (t ha ⁻¹)			Bilan minéral apparent (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)			C retournant au sol (t ha ⁻¹ an ⁻¹)
	Coton	Sorgho	Arachide	N	P	K	N	P	K	
Avec fertilisation minérale										
CC/AF	18,7	10,3	17,4	1,61 (0,7)	0,24 (0,2)	0,63 (0,4)	-21,7	4,8	6,4	0,87 (0,4)
2AJ/AF	14,5	8,6	8,9	1,05 (0,4)	0,18 (0,1)	0,45 (0,3)	-4,5	15,1	6,9	1,80 (0,8)
3AJ/AF	11,7	7,3	9,2	0,95 (0,4)	0,15 (0,1)	0,39 (0,3)	-1,3	12,5	7,4	2,20 (1,1)
Sans fertilisation Minérale										
CC/SF	6,0	5,3	8,6	0,69 (0,3)	0,10 (0,1)	0,26 (0,2)	-16,9	-2,5	-6,2	0,26 (0,2)
2AJ/SF	6,0	4,2	5,3	0,53 (0,2)	0,09 (0,1)	0,22 (0,1)	-13,0	-2,1	-5,3	1,20 (0,5)
3AJ/SF	5,0	3,6	4,8	0,47 (0,2)	0,08 (0,1)	0,19 (0,1)	-11,4	-1,8	-4,6	1,50 (0,8)

3.2. Effet de la jachère de courte durée sur l'évolution des concentrations de C et de nutriments du sol

Durant les 41 ans d'expérimentation, les concentrations de C et de nutriments (à l'exception de P lorsque les fertilisants minéraux ont été apportés) ont baissé dans les 20 premiers cm du sol tant en culture continue qu'en présence de la jachère dans la rotation culturale (Fig. 2 et 3). Comparativement à deux années consécutives de jachère (2AJ), la présence de trois années consécutives de jachère (3AJ) dans la rotation culturale n'a pas atténué ces baisses. Dans le moyen terme et lorsque toutes les cultures ainsi que les jachères avaient été fertilisées, la présence de la jachère dans la rotation culturale tend à modérer la baisse des concentrations de C et des bases échangeables, contrairement à la culture continue (CC).

En effet, les concentrations de C sur les parcelles incluant la jachère dans la rotation ont baissé pour ne représenter qu'environ 60% des concentrations initiales de 6,4 g kg⁻¹ après les

12 premières années d'expérimentation, malgré les entrées de C au sol qui ont été fortement élevées (Fig. 2a et b et Table 2). En culture continue, les concentrations de C à la fin de ces 12 premières années représentaient environ 50% des concentrations initiales et sont ainsi à des niveaux un peu plus faibles que ceux des traitements incluant la jachère. Après cette période où toutes les cultures ainsi que les jachères avaient été fertilisées, les concentrations de C pour les traitements incluant la jachère ont légèrement augmenté et représentaient 64 à 70% des concentrations initiales après 41 ans d'expérimentation. Par contre, sur les parcelles en culture continue avec ou sans apports minéraux et sur celles incluant la jachère sans fertilisation, les concentrations de C ont continué de baisser. Au bout des 41 ans, elles ne représentaient que 32-40% des concentrations initiales de C en culture continue et 46-52% de celles-ci en présence de jachère non-fertilisée.

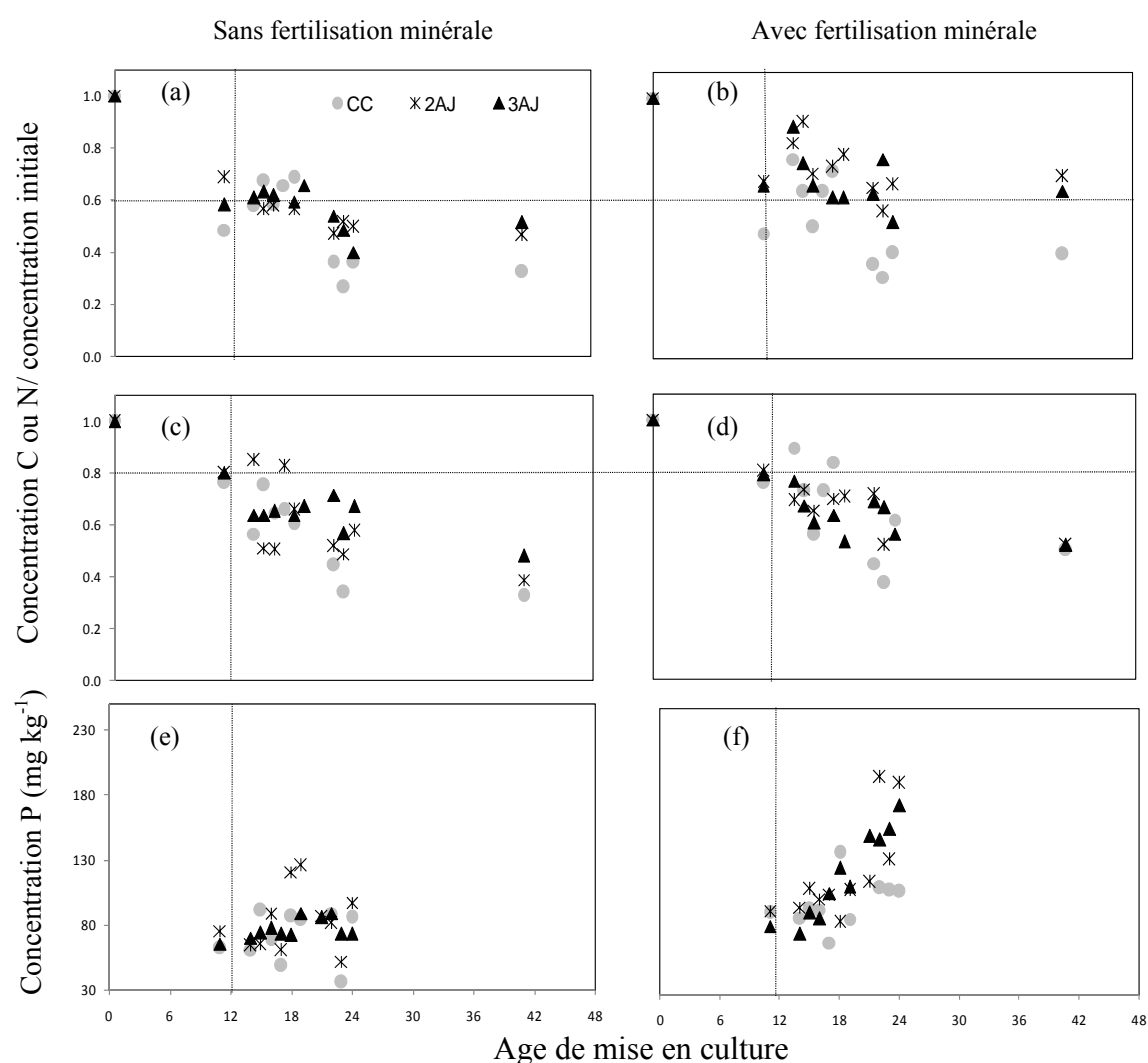


Figure 2 : évolution des concentrations du sol en C (a et b), N (c et d) et P (e et f) durant la période expérimentale. CC = culture continue, 2AJ= deux années de jachère, 3AJ = trois années de jachère.

Les concentrations moyennes de C avant 1995 où les cultures ont mieux répondu à la fertilisation minérale (Fig. 1) varient entre de 4,1 et 4,5 g kg⁻¹. Elles correspondent au stock²⁴ de C total de 11 à 13 t ha⁻¹, que nous considérons comme les stocks minima de C optimisant la réponse des cultures à la fertilisation minérale dans ce type de sol.

La baisse des concentrations de N dans le sol n'a pas été atténuée pour les traitements incluant la jachère (Fig. 2c et d), bien que le bilan N apparent suppose une amélioration lorsque la jachère a été fertilisée (Table 2). A la fin des 12 premières années, les concentrations du sol en N représentaient pour tous les traitements environ 80% des concentrations initiales de 0,61 g kg⁻¹. Par la suite, elles ont continué de baisser tant en culture continue qu'en présence de la jachère et très légèrement moins en parcelles fertilisées que non-fertilisées. A la fin des 41 ans d'expérimentation, les concentrations de N ne représentaient que 33-50% des concentrations initiales. Les stocks de N sont en moyenne passés de 1,71 t ha⁻¹ à 0,87 t ha⁻¹ après 41 ans de culture et correspondent à des baisses annuelles d'environ 20 kg N ha⁻¹. Ces baisses sont équivalentes aux pertes supposées par le bilan N apparent en culture continue (Table 2). Pour les traitements incluant la jachère, ces baisses du stock de N du sol sont largement plus élevées que les pertes supposées par le bilan apparent, indiquant d'autres pertes de N qui ne sont pas forcément liées aux rendements dans le cas de ces traitements. La baisse de la concentration de N qui a continué après les 12 premières années, cependant que celle de C a légèrement augmenté en cette période pour ces traitements incluant la jachère, traduit l'augmentation du rapport C/N et serait associée à de perte N par réorganisation microbienne.

Les concentrations du sol en P ont presque doublé lorsque les fertilisants minéraux ont été apportés, sans que l'effet de la jachère sur l'évolution de celles-ci ne soit clairement perceptible (Fig. 2e et f). En 1978 où les premières teneurs du sol en P ont été déterminées, les concentrations de P total ont en moyenne atteint 90 et 70 mg kg⁻¹ sur les parcelles fertilisées et non-fertilisées respectivement. En 1991, elles sont passées à environ 160 mg kg⁻¹ sur les parcelles fertilisées, avec une légère amélioration pour les traitements incluant la jachère et restent cohérentes aux résultats du bilan apparent P qui ont été plus positifs pour ces traitements (Table 2). Sur les parcelles non-fertilisées, les concentrations de P total en 1991 ont été plus ou moins maintenues au niveau atteint en 1978. Le phosphore assimilable a connu une évolution similaire, passant de 12 mg kg⁻¹ en 1978 à 13 mg kg⁻¹ en 2008 sur les parcelles

²⁴ Densité apparente du sol = 1.4

fertilisées et de 6 à 9 mg kg⁻¹ sur celles non-fertilisées. La CEC, le pH et le taux d'argile du sol ont faiblement baissé pendant la période expérimentale et ont été également peu influencés par la présence de la jachère dans la rotation culturale et par la fertilisation minérale. Entre 1978 et 2008, la CEC est en moyenne passé de 2,9 à 2,6 Cmol₊ kg⁻¹ et le pH de 6,1 à 5,6.

Les concentrations de bases échangeables (K⁺, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺) à la fin des 12 premières années de l'expérimentation, étaient déjà plus faibles en culture continue que pour les traitements incluant la jachère (Fig. 3).

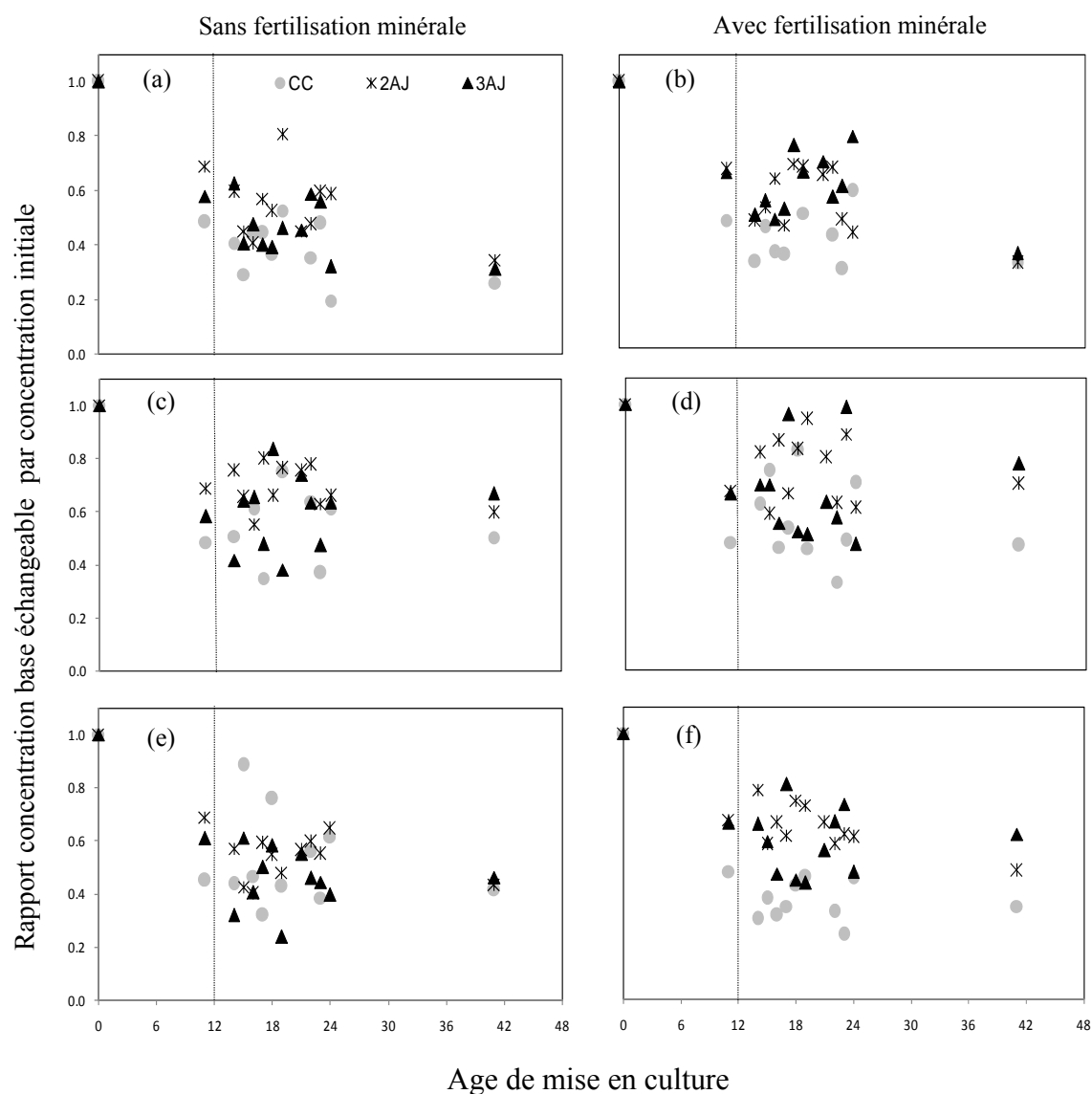


Figure 3 : évolution des concentrations de K⁺ (a et b), Ca⁺⁺ (c et d) et Mg⁺⁺ (e et f) échangeables durant la période expérimentale. CC = culture continue, 2AJ= deux années de jachère, 3AJ = trois années de jachère.

Après les 12 premières années, les concentrations de bases échangeables représentaient 46-48% des concentrations initiales de 0,28, 2,58 et 0,97 $\text{Cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ pour K, Ca et Mg respectivement en culture continue contre 62-68% de ces concentrations initiales pour les traitements avec jachère. Par la suite, elles ont peu évolué par rapport à ces niveaux atteints, avec cependant une légère amélioration de celles de Ca et Mg pour les traitements avec jachère fertilisée. La baisse des concentrations de bases échangeables qui a été ainsi légèrement plus prononcée en culture continue que pour les traitements incluant la jachère, est due aux exportations minérales élevées en raison de la fréquence des récoltes en culture continue (Table 2).

3.3. Diagnostic de l'évolution du stock de C du sol

Les entrées annuelles de C au sol estimées ont permis de simuler de façon satisfaisante l'évolution observée du stock de C du sol (Fig. 4).

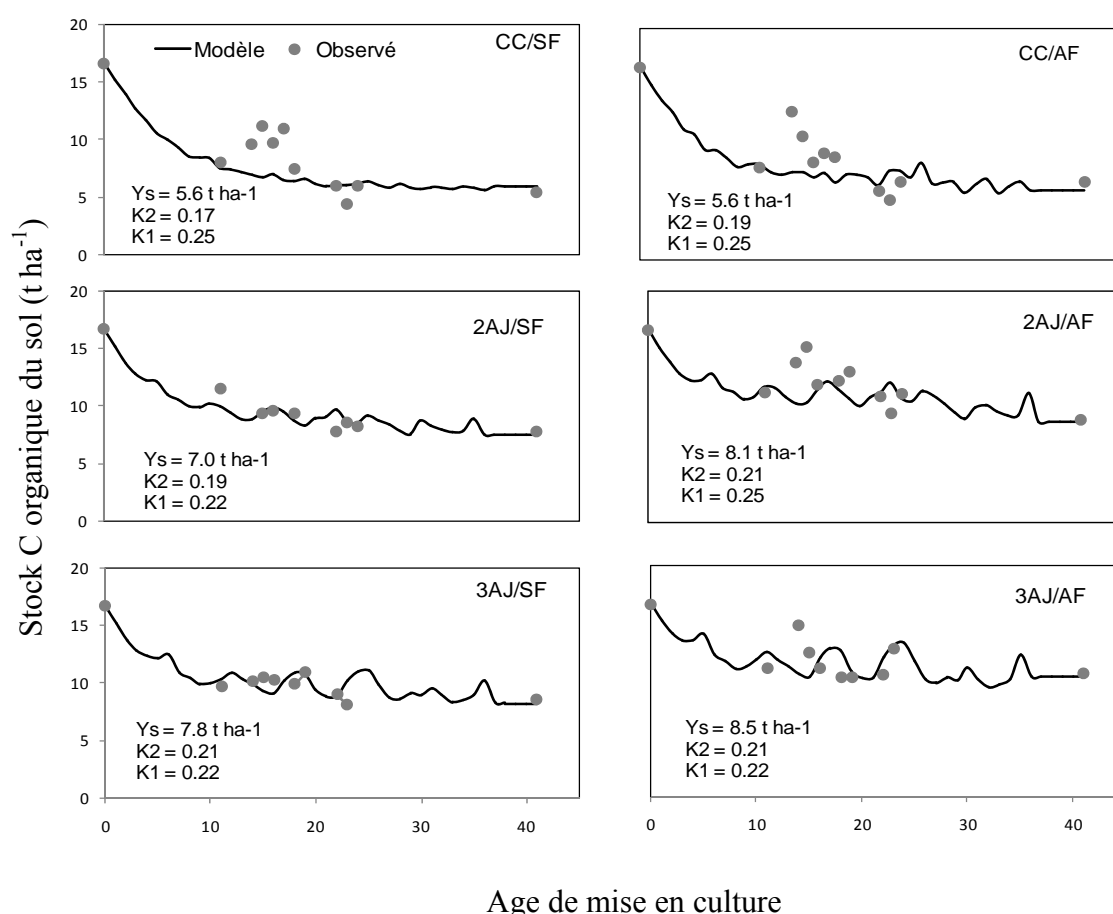


Figure 4 : simulation de l'évolution du stock de C du sol avec le modèle AMG. Y_s = stock de C stable, K₂ = taux de minéralisation annuelle de la fraction labile et K₁ = coefficient isohumique de M.

Le RMSE, correspondant au biais entre les stocks simulés et observés, a été de $1,93 \text{ t C ha}^{-1}$. Les concentrations du sol en C déterminées en 1982 et 1983 ont été trop élevées pour tous les traitements et ne nous ont pas semblé être l'effet de traitements, mais probablement un problème d'échantillonnage ou de variabilité spatiale du sol (chapitre 3, section 2.2).

La fraction de C stable (Y_{st}), ayant permis de décrire l'évolution du stock de C, représente 32 à 43% du stock initial de C total et est plus élevée pour les traitements incluant la jachère qu'en culture continue (Fig. 4). Le taux de perte annuelle (K_2) de la fraction labile de C varie entre 17 et 21% et le coefficient isohumique (K_1) entre 22 et 25%. Comme Y_{st} , K_2 a été légèrement plus élevé pour les traitements incluant la jachère qu'en culture continue.

L'objectif visé dans cette simulation a été de minimiser non seulement le biais entre les stocks simulés et observés, mais surtout le risque d'erreur dans les simulations en raison des imprécisions qu'induirait la non-mesure des biomasses en jachère et d'autres paramètres du modèle qui sont difficiles à déterminer. Les valeurs de K_2 allant de 17 à 21% ainsi paramétrés sont celles qui minimisent le RMSE et le risque d'erreur pour des valeurs de K_1 ou M aussi variables qu'elles peuvent être (Fig. 6).

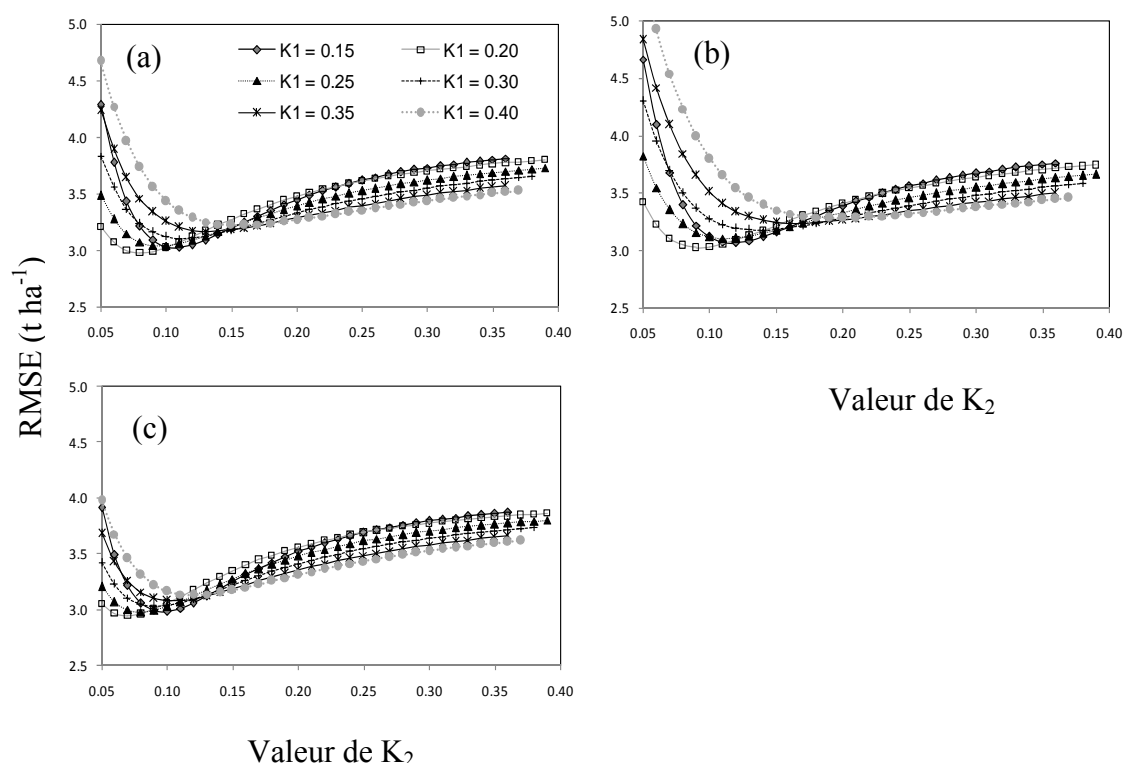


Figure 5 : relation entre le Root Mean Square Error (RMSE) et le coefficient de minéralisation de C labile du sol (K_2) en fonction du coefficient isohumique de C (K_1) et des entrées C au sol (M). a = M est maintenue à la valeur moyenne, b = $M + \delta$ et c = $M - \delta$.

Si K_2 était maintenu à des valeurs plus faibles que 17%, certes le RMSE devrait être légèrement faible pour des valeurs de K_1 de 20 à 25% paramétrées (Fig. 6a). Mais une moindre erreur tant sur ces valeurs de K_1 que sur celles de M détériorerait véritablement la qualité des simulations (Fig. 6b et c). De la même manière, s'il était maintenu à des valeurs plus élevées que 21%, la qualité des simulations devrait être moins bonne pour toutes les valeurs de K_1 et de M .

La version ainsi paramétrée du modèle a été appliquée pour explorer l'équilibre du stock de C et calculer les apports externes qui restaureraient le stock C à des niveaux moyens de 11 t C ha^{-1} d'avant 1995, ayant optimisé la réponse des cultures à la fertilisation minérale. Les simulations montrent que, sur les parcelles en culture continue pendant 41 ans, le stock de C a atteint un niveau d'équilibre (Q_0) d'environ 6 t ha^{-1} , contre des stocks d'équilibre de $7\text{--}10 \text{ t ha}^{-1}$ sur les parcelles où la jachère avait été alternée aux cultures (Table 3).

Table 3 : Exploration de l'évolution du stock de C du sol suite aux apports externes de C , après 41 ans de mise en culture

Apport externe $C \text{ (t ha}^{-1} \text{ an}^{-1})$	Niveaux explorés du nouvel équilibre du stock de C du sol								
	CC/SF			CC/AF			2AJ/SF		
	Stock	Par	Nombre	Stock	Par	Nombre	Stock	Par	Nombre
	(t C ha^{-1})	rappel à C_{opt}	années apport C	(t C ha^{-1})	rappel à C_{opt}	d'années d'apport C	(t C ha^{-1})	rappel à C_{opt}	années apport C
0,0	6,0 ^a	-		6,0	-		7,5	-	
0,5	6,8	NA	13	7,4	NA	19	9,3	NA	13
1,0	7,6	NA	26	8,0	NA	14	10,0	NA	23
1,5	8,3	NA	20	8,7	NA	20	10,6	NA	16
2,0	9,0	NA	11	9,3	NA	15	11,3	Atteint	22
2,5	9,8	NA	28	10,0	NA	20	11,9	Atteint	17
3,0	10,5	NA	23	10,6	NA	17	12,6	Atteint	20
3,5	11,2	Atteint	21	11,3	Atteint	20	13,2	Atteint	18
	2AJ/AF			3AJ/SF			3AJ/AF		
	Stock	Par	Nombre	Stock	Par	Nombre	Stock	Par	Nombre
	(t C ha^{-1})	rappel à C_{opt}	d'années d'apport C	(t C ha^{-1})	rappel à C_{opt}	d'années d'apport C	(t C ha^{-1})	rappel à C_{opt}	années apport C
0,0	8,7	-		8,2	-		10,4	-	
0,5	10,8	NA	12	10,1	NA	9	11,7	Atteint	11
1,0	11,4	Atteint	18	10,7	NA	12	12,3	Atteint	14
1,5	12,0	Atteint	20	11,3	Atteint	14	12,9	Atteint	16
2,0	12,5	Atteint	13	11,9	Atteint	15	13,5	Atteint	18
2,5	13,1	Atteint	25	12,5	Atteint	16	14,1	Atteint	20
3,0	13,7	Atteint	15	13,1	Atteint	18	14,7	Atteint	22
3,5	14,3	Atteint	16	13,7	Atteint	19	15,3	Atteint	23

^a représente le stock d'équilibre de C exploré sans apport externe de C

^b $C_{opt} \approx 11 \text{ t C ha}^{-1}$ et correspond aux stocks moyens de C d'avant 1995 où la réponse des cultures à la fertilisation minérale a été optimale ; NA= signifie le stock C optimal ne peut être atteint avant le nouvel équilibre

En culture continue, les stocks de C à l'équilibre sont quasi égaux aux stocks stables de C de $5,6 \text{ t ha}^{-1}$ (Fig. 4), traduisant dans le long terme la faible contribution de la MO du sol à la nutrition minérale des plantes (à travers sa minéralisation). Tandis que pour les traitements incluant la jachère, les stocks d'équilibre de C dépassent le stock stable de $1,6$ à $2,5 \text{ t ha}^{-1}$. Pour tous les traitements, les stocks d'équilibre sans apport externe de C sont en dessous des stocks optima (C_{opt}) de 11 à 13 t ha^{-1} d'avant 1995 où la réponse des cultures à la fertilisation minérale a été maximale (Fig. 1). Les explorations montrent qu'à partir de la 42^{ème} année, les apports annuels de C de moins de $3,5 \text{ t ha}^{-1}$ (plus que l'équivalent de C produit par une jachère naturelle) ne rétabliraient pas ces stocks C_{opt} sur les parcelles en culture continue (Table 3). Un nouvel équilibre (Q_N) s'établirait entre 7 et 10 t C ha^{-1} , après 11 à 28 années d'apports. Sur les parcelles où deux/trois années consécutives de jachère sans fertilisation minérale avaient été alternées aux cultures, il faudrait $1,5$ à $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ d'apport C pendant 14 à 22 ans pour rétablir le stock optimal de C. Par contre, sur les parcelles où la jachère a été fertilisée, des apports d'environ $1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ rétabliraient cet optimum du stock de C après 11 à 18 années d'application.

L'exploration de l'effet de ces apports externes de C à différents âges de mise en culture de la parcelle montre que, pour des apports effectués au cours des premières années qui précèdent la défriche, le taux d'accumulation de C (Acc) serait faible et le rendement des apports de C (R_Q) ne dépasserait guère 3% des quantités apportées (Fig. 6). Pendant cette phase, R_Q est peu dépendant des quantités apportées de C, indiquant peu d'intérêt de fractionner les apports (Fig. 6b).

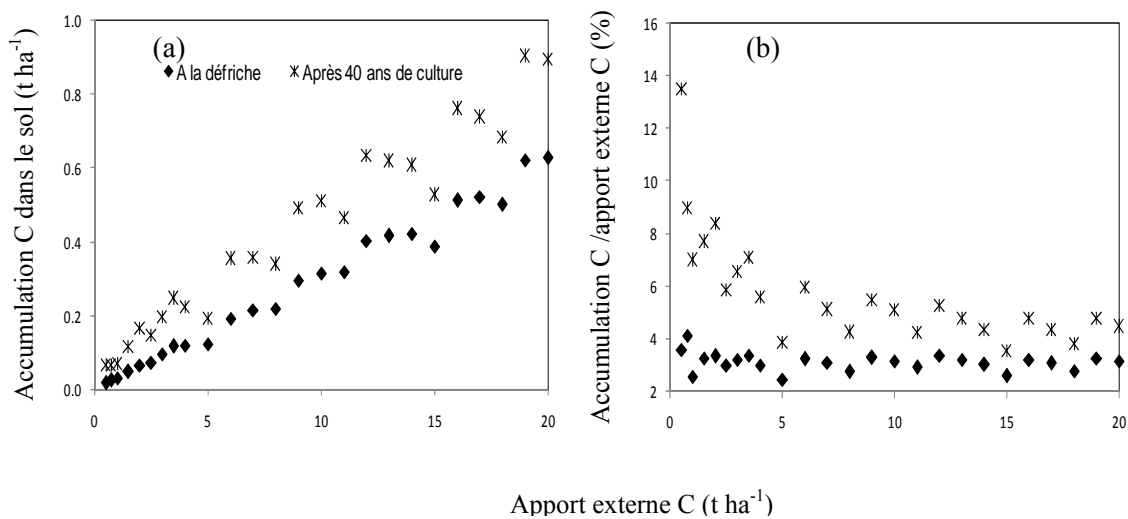


Figure 6 : diagnostic de l'impact des apports externes de C sur l'évolution du stock de C du sol à différentes périodes de la mise en culture du sol.

Le faible taux d'accumulation de C au sol pendant les premières années après la défriche s'explique par des pertes élevées de C en cette période (demi-vie = 5 à 6 ans). En revanche, pour des apports effectués après plusieurs années de mise en culture, les taux d'accumulation de C seraient légèrement plus élevés et les rendements des apports de C seront élevés pour des quantités faibles. En moyenne, R_Q a été de 8 ($\pm 2,4$) et 5% ($\pm 0,6$) pour des apports externes inférieurs et supérieurs à 3,5 t C ha⁻¹ an⁻¹ respectivement. Ces résultats soulignent deux aspects devant régir la gestion du statut organique de ces sols tropicaux. Pendant les premières années qui précèdent la défriche, toute intervention qui viserait à préserver le stock C de ces sols seulement à travers des amendements organiques, induirait des effets très limités. Des amendements organiques effectués après la phase de baisse rapide du stock de C (10-15 premières années) pourront restaurer à un certain niveau le stock organique des sols et seront plus efficaces pour des apports fractionnés.

4. Discussion

Comparativement à la culture continue, l'alternance de deux ou trois années consécutives de jachère à la rotation culturale arachide/coton/sorgho n'a pas amélioré le niveau des rendements de culture, mais tend à stabiliser la production dans le long terme (cf. Fig. 1). D'autre part, la présence de la jachère dans la rotation n'a pas empêché la baisse du stock de C et des nutriments de ce sol tropical (Fig. 2 et 3). Comparativement à la culture continue, elle a atténué la baisse du stock de C et des bases échangeables. Cet effet modérateur de la jachère sur la baisse du stock de C du sol n'a été perceptible qu'en présence d'apports minéraux et après les premières années de mise en culture du sol.

La jachère est considérée comme une technique pouvant améliorer le rendement des cultures et la fertilité du sol à cause de sa potentialité à (i) préserver ou améliorer le stock minéral du sol, (ii) stimuler les restitutions organiques et l'activité microbienne, (ii) assurer la stabilité structurale du sol et (iv) régir des interactions positives entre les fractions organiques, biologiques et minérales du sol (Nye et *al.*, 1960 ; Morel et *al.*, 1972 ; Talineau et *al.*, 1975 ; Valentin et *al.*, 1990). De toutes ces fonctions de la jachère, celle qui à l'évidence améliorerait les rendements de cultures est l'amélioration du statut minéral du sol, comme le ferait par exemple la fertilisation minérale. Cependant, l'amélioration du stock minéral du sol est difficilement assurée dans les systèmes où la jachère naturelle de courte durée (moins de 5 ans) est pratiquée (Pieri, 1989 ; Feller et *al.*, 1993). Dans des jachères herbacées de moins de 4 ans, des baisses des stocks minéraux avec des rendements de cultures comparables à ceux

obtenus en culture continue ont été rapportées au Cameroun et au Burkina Faso (Harmand et *al.*, 1998). Tandis que des augmentations du stock de N, associées aux rendements élevés de sorgho, ont été rapportées dans des jachères artificielles aux essences fixatrices de N (Drechsel et *al.*, 1996 ; Bruresh et *al.*, 1998). Dans des jachères naturelles brûlées, il a été également rapporté un enrichissement minéral du sol au cours des premières années, avec toutefois des améliorations très précaires de rendements de maïs (Rao et *al.*, 1998). Dans la présente étude, la présence de la jachère naturelle dans la rotation culturale a exacerbé les pertes de N, telles que révélées par le bilan N apparent. Puisque la jachère a été dominée par des graminées avec des biomasses pauvres en N (C/N élevé), leur minéralisation induirait des pertes N liées à la réorganisation microbienne et à l'immobilisation.

Néanmoins, l'introduction de la jachère dans la rotation culturale a stabilisé la production dans le long terme à cause des stocks d'équilibre de C qui ont été maintenus à des niveaux plus élevés qu'en culture continue et des bases échangeables qui ont moins baissé (Fig. 2 et 3). Cet effet de la jachère sur le stock de C a été traduit par un stock de C stable plus élevé (Hoesflood et *al.*, 1993) et un taux de minéralisation de la fraction labile de C également élevé (Feller et *al.*, 1993). Le niveau élevé du stock de C stable en présence de la jachère s'explique par le nombre réduit de labour qui préserve le C associé aux particules fines du sol contre la minéralisation (Balesdent et *al.*, 2000). Feller et *al.* (1991b) ont rapporté sur des parcelles en jachère, des proportions plus élevées de C associé à la fraction 0-2 μm du sol qu'en culture continue. Ce niveau plus élevé du stock de C stable en présence de la jachère qu'en culture continue suppose que cette fraction de C n'est pas inerte, mais sa minéralisation est lente et qu'elle peut être considérée comme constante dans l'équation du modèle (Groot et *al.*, 1998 ; Andriulo et *al.*, 1999). Le stock de C stable simulé ici (7 t ha^{-1}) est du même ordre de grandeur que celui simulé à Dalanda (8 t ha^{-1}) mais, il est plus faible que ceux simulés à Elavagnon (10 t C ha^{-1}) et à Kouvé (15 t C ha^{-1}). Cette variabilité inter-sites du stock de C stable s'expliquerait, entre autre, par la nature de la végétation ayant précédé la défriche (chapitre 3). Les sites de Toaga et de Dalanda sont en régions de savanes avec peu de ligneux dans la végétation primaire tandis que ceux d'Elavagnon et de Kouvé sont en régions plus nettement forestières et avec des sols aux taux d'argile légèrement plus élevés (Chapitre 2). Le taux de minéralisation plus élevé de la fraction labile de C en présence de la jachère qu'en culture continue s'explique par l'activité microbienne plus intense (Ouatara et *al.*, 1997) et par l'augmentation apparente du ratio C/N qui a résulté du maintien dans le long terme des concentrations de C tandis que celles de N continuaient de baisser (Fig. 2).

Les explorations montrent que la restauration ou le maintien du stock de C à des niveaux ayant optimisé la réponse des cultures à la fertilisation minérale, nécessiteraient des apports externes de C élevés mais plus faibles lorsque la jachère a été alternée aux cultures. D'autre part, si ces apports externes de C sont effectués au cours des premières années qui précèdent la défriche, les accroissements du stock de C seraient très faibles ; expliquant ainsi la quasi absence de l'effet de la jachère sur l'évolution du stock de C au cours des premières années. Les résultats explorés ici (quantités de C à apporter et niveau de stock escompté) sont cohérents avec les résultats expérimentaux rapportés dans la sous-région (Pichot *et al.*, 1981 ; Feller *et al.*, 1981 ; Pieri, 1989 ; Sédogo, 1993). Les quantités aussi élevées de C externe à apporter suscitent des questions : (i) de faisabilité, en raison de faibles moyens de travail dont disposent les agriculteurs et l'insuffisance de matériel (effectif du cheptel faible et parcelles en défriche saturées) et (ii) de rentabilité économique des opérations, en raison des incidences toujours faibles du stock de C du sol sur l'amélioration des rendements de cultures (Pieri, 1989). Les explorations montrent également que la proportion des apports externes qui contribuerait à l'augmentation du stock C du sol serait faible pour des apports élevés de C et s'explique par la dégradation dans le long terme des caractéristiques physiques du sol (Maroko *et al.*, 1998 ; Barrios *et al.*, 1997 ; Schroth *et al.*, 1995). Ce résultat souligne d'une part l'intérêt de fractionner les amendements organiques et suppose d'autre part que le semis direct sous couverture végétale (SCV) serait, plus qu'un enfouissement de la biomasse, une technique devant au mieux restaurer le stock de C de ces sols. La biomasse étant en SCV utilisée en paillage, sa décomposition est progressive et les entrées de C au sol sont échelonnées. D'autres effets bénéfiques des SCV tels que la diminution de la température et l'alternance des périodes sèches et humides qui sont peu contrastées, joueraient à la faveur de cette restauration (Bussiere *et al.*, 1994 ; Dominy *et al.*, 2002).

5. Conclusion

Les résultats de la présente étude montrent que l'alternance aux cultures de 2 ou 3 années consécutives de jachère naturelle induit dans le court terme des effets très marginaux tant sur les rendements de culture que sur le maintien des indicateurs de la fertilité du sol. Dans le long terme, les rendements de cultures sont stabilisés et lorsque la jachère est fertilisée, le stock de C du sol est maintenu à des niveaux d'équilibre plus élevés qu'en culture continue. Ces avantages de la jachère sont si faibles pour justifier (i) les coûts liés à sa mise en place (fertilisation) et (ii) la réduction des productions en raison du maintien périodique de la parcelle hors culture.

Chapitre 6

Nouvelles adaptations de gestion et évolution de la fertilité des sols cultivés en milieu paysan

Introduction

Dans la plupart des pays d'Afrique de l'Ouest, la filière coton a été un réel facteur d'intensification agricole grâce à l'accès aux intrants²⁵ agricoles facilité et l'adoption par les gouvernements de mesures incitatives. Au Togo, la filière coton a été d'une part dotée d'une structure²⁶ qui, entre autre, assure l'encadrement de proximité des producteurs et valorise la culture à travers la mise en place d'intrants agricoles et la collecte de coton-graine produit. La filière a été d'autre part organisée avec des structures de gestion à l'unité (i) de villages (Groupements de Producteurs de Coton-GPC), (ii) de cantons (Union Cantonale des GPC, UCGPC), (iii) de préfectures (UPGPC), (iv) de régions (URGPC) et (v) nationale (Fédération Nationale des GPC, FNGPC). Avec cette structuration, les agriculteurs appartenant à un GPC ont accès (et nulle part dans une autre filière) aux crédits intrants agricoles. Au début de chaque campagne cotonnière, les intrants agricoles leur sont octroyés au prorata de superficies de coton ensemencées et les frais leur sont prélevés en fin de campagne sur la recette de coton-gaine vendu. Les intrants acquis dans ce cadre permettaient également d'améliorer le rendement des autres cultures à travers l'arrière effet des engrais et/ou l'utilisation d'une partie en culture céréalière. La filière coton a, en outre, bénéficié de mesures incitatives que sont : la subvention du prix des intrants agricoles jusqu'aux années 90 et la vulgarisation de variétés productives et d'itinéraires techniques adéquats. Ces mesures d'accompagnement ont été traduites par un engouement des agriculteurs à la culture cotonnière (taux moyen de diffusion annuelle de 19% ; DSID, 1996) et se sont soldées par une remarquable augmentation des superficies, des rendements et de la production qui est passée de 10 000 tonnes en 1977 à 187 000 tonnes en 1998 (Larson, 2004).

Depuis 1999, la production de coton connaît un recul notoire avec un taux annuel moyen de régression de 14% entre 1998 et 2005. Cette baisse a été observée à travers la diminution du nombre de producteurs (taux annuel de régression de 13% entre 1998 et 2001) et des

²⁵ Engrais, insecticide...

²⁶ Nouvelle Société Cotonnière du Togo (NSCT), ex-Société Togolaise de Coton (SOTOCO).

superficiés (baisse de 72% entre 1998 et 2008). Les causes du désistement des agriculteurs à la culture cotonnière sont de plusieurs ordres. Ce sont : (i) le versement très tardif des recettes de coton-graine en raison des difficultés financières de l'institution en charge de la filière, (ii) la baisse du prix d'achat de coton-graine et l'augmentation du prix des intrants agricoles suite à l'évolution défavorable des cours mondiaux de coton-fibre et des engrais et (iii) l'endettement contentieux²⁷ des GPC qui s'est traduit par un dysfonctionnement généralisé des structures cotonnières à la base (GPC, UCGPC, UPGPC, URGPC et FNGPC).

Cette situation de crise cotonnière limite l'accès des agriculteurs aux intrants agricoles et pourra éventuellement susciter de nouvelles adaptations de gestion de la fertilité des sols. L'objectif de ce chapitre a été de recenser les éventuelles adaptations de gestion de la fertilité du sol et d'explorer à partir des résultats obtenus en station leurs impacts sur la durabilité et la stabilité des systèmes de production.

I. Quelques caractéristiques des exploitations agricoles et évolution des pratiques de gestion de la fertilité du sol en milieu paysan

1.1. Choix culturels opérés par les agriculteurs en réponse à la baisse de la culture cotonnière

La baisse de la culture cotonnière a été quasi-totale à Kpové et Agavé-Konda et fortement marquée par ailleurs (Waragni, Manga et Poissongui) (Table 1). En plus du nombre de producteurs qui a diminué de 44 à près de 100% selon les villages d'enquête, les superficies emblavées par agriculteur ont été partout réduites et plafonnent aujourd'hui à 0,5 ha (période 1 de la table 1), contre 4 ha en période de production normale de coton dans le pays (période 2). En réponse à cette baisse de la culture cotonnière, les agriculteurs ont opéré des choix culturels (adoption et/ou augmentation de superficies des autres cultures) qui sont différents suivant les zones. A Kpové, la baisse de la culture cotonnière a été traduite par l'accroissement des superficies et du taux d'adoption de la culture du manioc et de la plantation du teck (Table 1).

²⁷ Le système de commercialisation prévoit la collecte primaire de coton-graine de chaque GPC par une équipe d'achat composée des membres dudit groupement. Le coton collecté est livré à la SOTOCO (Etat) ou à des égreneurs privés mandatés. A la livraison, une équipe composée des représentants des producteurs et de ceux de la SOTOCO, procède au contrôle de la qualité du coton-graine. Des caisses de coton-graine, collectées au premier choix (plus cher) par les équipes d'achat des GPC, ont été fréquemment déclarées au second choix par l'équipe composite de qualité, entraînant au sein des groupements des manques à gagner dont le paiement a été source de véritables conflits.

Table 1 : Importance relative des cultures et évolution des superficies emblavées à l'unité de l'exploitation agricole (nombres entre parenthèses sont les pourcentages d'agriculteurs concernés)

Village	Taille des superficies emblavées par culture (ha/producteur/an)									
	Cultures de rente		Cultures vivrières						Autres	
	Coton	Café	Maïs	Sorgho/mil	Niébé	Arachide	Igname	Manioc	Palmier à huile	Teck
Kpové										
Période1 ^a	Nég	N-C	0,25-2,0 ^b (100)	Nég	0,12-0,25 (100)	0,12-0,5 (72)	0,12-0,5 (43)	0,25-1,0 (86)	0,25-15 (100)	0,25-13 (86)
Période 2	0,5-3,0 (100)	N-C	0,25-2,0 (100)	Nég	0,12-0,25 (43)	0,12-0,5 (43)	0,12-0,5 (43)	0,12-0,25 (28)	0,25-16 (86)	0,25-8 (28)
Agavé -Konda										
Période1	0,25-0,75 (14)	0,25-1,0 (46)	0,25-3,0 (100)	0,12-1,5 (72)	0,12-1,0 (72)	Nég	Nég	0,12-0,5 (86)	0,12-2,5 (28)	N-C
Période 2	0,25-4,0 (100)	0,25-1,5 (46)	0,25-2,5 (100)	0,12-0,75 (43)	0,12-0,75 (43)	Nég	Nég	0,12-0,25 (14)	0,25-2,0 (28)	N-C
Waragni										
Période1	0,25-0,5 (28)	N-C	0,25-2,0 (78)	0,25-2,0 (86)	0,25-0,75 (36)	0,25-0,5 (43)	0,25-0,75 (93)	0,25-0,5 (43)	Nég	Nég
Période2	0,25-1,0 (100)	N-C	0,25-0,5 (57)	0,5-4,0 (100)	0,25-0,5 (43)	0,25-0,5 (57)	0,25-1,0 (86)	Nég	Nég	Nég
Manga										
Période1	0,25-0,5 (28)	N-C	0,25-1,5 (89)	0,25-3,5 (100)	0,25-0,5 (56)	0,5-1,5 (95)	0,25-1,5 (100)	0,12-0,25 (33)	Nég	Nég
Période2	0,25-2,5 (100)	N-C	0,25-2,0 (100)	0,25-2,0 (100)	0,25-0,5 (67)	0,25-2,5 (100)	0,25-1,5 (100)	0,12-0,25 (33)	Nég	Nég
Poissongui										
Période 1	0,25-0,5 (56)	N-C	0,25-3,0 (81)	0,75-4,0 (100)	Nég	0,25-0,75 (69)	N-C	N-C	N-C	N-C
Période 2	0,25-1,5 (100)	N-C	0,25-0,5 (25)	0,5-2,5 (88)	Nég	0,25-0,5 (38)	N-C	N-C	N-C	N-C

^a La Période 1 représente les dix dernières années et la Période 2 la phase de production normale de coton. ^b Représente la variabilité des superficies déclarée par producteur dans le village d'enquête. Les nombres entre parenthèses représentent les pourcentages de paysans pratiquant la culture concernée dans le groupe interviewé. Nég = négligeable, N-C = culture non pratiquée.

La culture du manioc et la plantation du teck, qui n'étaient pratiquées que par moins de 30% des agriculteurs à Kouvé, il y a environ une dizaine d'années, sont actuellement pratiquées par près de 85% de ceux-ci. D'autre part, les superficies du manioc qui ne dépassaient guère 0,25 ha en période de production intense de coton, atteignent actuellement 1 ha et celles du teck sont passées de 8 à 13 ha chez les grands exploitants. Dans les autres villages, la baisse de la culture cotonnière a été essentiellement traduite par l'accroissement des superficies et/ou du taux d'adoption de céréales. A Agavé-Konda, le sorgho/mil est actuellement cultivé par environ 70% des agriculteurs et sur des superficies pouvant atteindre 1,5 ha contre près de 40% des agriculteurs qui, il y a une dizaine d'années, en cultivaient sur des superficies deux fois plus

faibles. Le niébé et le manioc sont également cultivés par un plus grand nombre d'agriculteurs en cette phase de baisse de la culture cotonnière mais les superficies par agriculteur n'ont pas assez augmenté (Table 1). A Waragni et Poissongui, environ 80% des agriculteurs cultivent aujourd'hui le maïs sur des superficies atteignant 3-4 ha, contre respectivement 57 et 25% des agriculteurs qui en cultivaient sur moins de 0,5 ha, il y a une dizaine d'années. A Poissongui et Manga, les superficies du sorgho/mil ont été également augmentées par rapport à la période de production intense de coton.

1.2. Taille des superficies et nombre de cultures à l'unité de l'exploitation agricole avant et après la baisse de la culture cotonnière

Depuis longtemps, les exploitations agricoles en milieu paysan au Togo sont caractérisées par la petite taille de superficies consacrées à chaque culture et par la diversité des cultures au sein de chaque exploitation, traduisant toute absence de spécialisation et caractéristique d'une agriculture de subsistance (Table 1). Les superficies emblavées par agriculteur et pour chacune des cultures ne dépassent guère 4 ha, à l'exception des cultures pérennes à Kpové où 14% des agriculteurs interviewés ont déclaré des plantations de palmier à huile et de teck plafonnant entre 13 et 15 ha. A l'exception de Poissongui où les conditions pédoclimatiques (Chapitre 2) ne permettent que la production de 4 principales cultures, la plupart des agriculteurs des autres villages d'enquête produisent à la fois 2 à 3 cultures sur des superficies relativement grandes puis d'autres sur de très petites superficies. Les cultures pratiquées aujourd'hui sur des superficies relativement grandes et par un grand nombre d'agriculteurs sont : (i) le maïs dans tous les villages d'enquête, (ii) le sorgho/mil dans les villages du Nord et du Centre, (iii) le palmier à huile et le teck à Kpové. Les cultures pratiquées sur des superficies de moins de 1 ha sont : le niébé (à l'exception d'Agavé-Konda), l'igname et l'arachide (à l'exception de Manga) et le manioc (à l'exception de Kpové). En général, le sorgho, le mil, le niébé et l'arachide sont cultivés en association ou en dérobée avec le maïs. La production de tomate a été déclarée à Kpové et à Poissongui mais les superficies et son adoption restent encore faibles.

1.3. Gestion de la fertilité du sol en milieu paysan après la baisse de la culture cotonnière

La baisse de la culture cotonnière a été traduite par la diminution du taux d'agriculteurs appliquant d'engrais minéraux et dans une moindre mesure par les quantités appliquées par agriculteur (Table 2). Cette diminution a été assez prononcée dans les villages du sud et du centre qu'à l'extrême nord du pays. Dans les villages de Kpové, Agavé-Konda, Waragni et Manga, ce sont respectivement environ 85, 40, 70 et 65% des agriculteurs interviewés qui pratiquent la

fertilisation minérale en cette phase de baisse de la culture cotonnière et pour des quantités par agriculteur ne dépassant guère 300 kg an⁻¹. A Poissongui en revanche, tous les agriculteurs interviewés continuent la fertilisation minérale avec des quantités d'engrais par agriculteur de 50–650 kg an⁻¹ et qui sont comparables aux quantités de 50-700 kg an⁻¹ qu'ils appliquaient en période de production normale de coton. Ce sont également dans ces villages où la pratique de la fertilisation minérale a fortement diminué que les amendements organiques sont quasi-absents (Table 2).

Table 2 : Gestion en milieu paysan de la fertilité du sol, disponibilité et accessibilité à l'espace agraire (les nombres entre parenthèses représentent les pourcentages d'agriculteurs)

Village	Gestion fertilité sol				Disponibilité et accessibilité à la terre				
	Engrais minéraux (kg/agriculteur/an)		Amendements organiques		En jachère ha/agric.	Mode d'accès			
	Période 1	Période 2	Annuel	Occasionnel		Héritage	Location	Don	Achat
Kpové	50-300 (86)	50-600 (100)	- (Aucun)	- (Aucun)	2 à 15 (100)	(57)	-	(43)	-
Agavé	50-300 (43)	50-400 (100)	- (Aucun)	- (Aucun)	1 à 4 (32)	-	(57)	(28)	(14)
Waragni	50-300 (71)	50-200 (100)	- (Aucun)	DQ (28)	5 à 15 (71)	(57)	(14)	(28)	-
Manga	50-275 (67)	50-400 (100)	- (Aucun)	DQ (22)	2 à 20 (100)	(100)	-	-	-
Poissongui	50-650 (100)	50-700 (100)	DQ (88)	DQ (12)	Néant (100)	(100)	-	-	-

DQ = difficile à quantifier

Aucun des agriculteurs interviewés à Manga, Waragni, Agavé-Konda et Kpové n'effectue annuellement des amendements organiques. De faibles apports de fumier rapportés par moins de 30% des agriculteurs interviewés à Waragni et Manga ne sont qu'occasionnels. A Poissongui en revanche, les amendements organiques sont annuellement pratiqués par environ 88% des agriculteurs interviewés et les 12% restants en appliquent occasionnellement. Les quantités de matière organique correspondantes sont cependant peu précises et difficiles à quantifier. Par agriculteur et par an, les apports de fumier et de compost effectués varieraient respectivement entre 5 et 30 et entre 3 et 15 charrettes d'âne (Fig. 1).

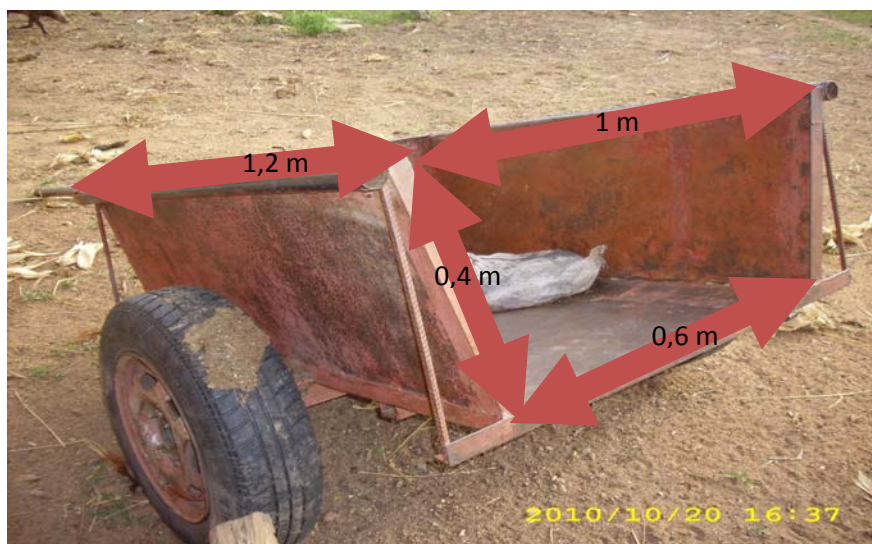


Figure 1 : Charrette d'âne servant à la mesure de fumier ou de compost au nord du Togo ($V \approx 0,3 \text{ m}^3$)

Au Nord du Togo, le fumier est depuis longtemps utilisé pour amender les parcelles cultivées mais le compostage tel que observé à Poissongui a été récemment adopté. L'achat de fumier, à 700-800 FCFA la charrette d'âne, a été également adopté récemment par certains de ces agriculteurs du nord du Togo.

La faible motivation des agriculteurs à investir au maintien de la fertilité des sols cultivés a été partout justifiée par le caractère pluvial de l'agriculture et le prix aléatoire des produits agricoles qui rendent très incertains les investissements. Par ailleurs, le niveau de fertilité des sols et la relative disponibilité de l'espace agraire dans certaines localités sous-tendent cette faible motivation. A Kpové, Agavé, Waragni et Manga où la fertilisation minérale a été fortement abandonnée et où la fertilisation organique est quasi-absente, plus de 70% des agriculteurs peuvent disposer de 2 à 15 ha de parcelles en jachère (Table 2). En revanche, à Poissongui où les agriculteurs investissent tant pour l'achat d'engrais minéraux que pour des restitutions organiques, le niveau de fertilité des sols ne permet aucune production de céréales²⁸ sans que la fertilisation ne soit effectuée et la pratique de la jachère n'est plus possible. L'absence quasi-totale des amendements organiques dans les villages du sud et du centre est due au faible développement de l'élevage mais également à la non-intégration de l'élevage à la production végétale. A Manga par exemple, l'élevage des bovins est développé pourtant l'amendement organique n'est pas pratiqué. L'élevage est spécifiquement pratiqué par des peuls qui sont

²⁸Dans les villages de Kpové, Agavé-Konda, Waragni et Manga, les cultures pour lesquelles les engrais minéraux sont apportés sont essentiellement le maïs et le coton, tandis que le sorgho et le mil doivent également être fertilisés à Poissongui afin d'espérer une production.

rarement des cultivateurs. Un dernier élément qui semble déterminer la volonté des agriculteurs à investir au maintien de la fertilité du sol est le mode d'accès à la terre. A Agavé-Konda où près de 80% des exploitants agricoles ne sont pas des propriétaires terriens (location et don ; Table 2), ce sont moins de la moitié de ceux-ci qui investissent dans l'achat d'engrais minéraux. Dans cette localité du pays, il existe une forme de location du foncier (localement appelée "dibi-mandibi") qui profite au propriétaire terrien lorsque l'exploitant agricole améliore la productivité des parcelles cultivées. Elle consiste à partager entre l'exploitant agricole (2/3) et le propriétaire terrien (1/3) le produit de récolte lorsqu'il s'agit des cultures annuelles ou à diviser l'exploitation (sans cessation du capital foncier) lorsqu'il s'agit des cultures pérennes (café et palmier à huile). S'il advenait que les plants de café de l'exploitant agricole meurent²⁹ ou s'il déterre ses palmiers à huile, il faudra remettre la parcelle en culture pour un nouveau partage. Enfin, il existe par endroit (exemple à Kpové) des litiges fonciers inter-communautés qui rendent assez incertain le statut foncier de l'exploitant agricole.

En somme, la baisse de la culture cotonnière a été traduite par la diminution du taux d'agriculteurs appliquant des engrais minéraux, notamment dans les zones où la pratique de la jachère est relativement possible et où le niveau actuel de fertilité des sols permet quelque production sans fertilisation. En réponse à la baisse de la culture cotonnière, certains agriculteurs ont adopté et/ou élargi les superficies des cultures qui sont peu risquées en raison de leur faible sensibilité aux aléas climatiques et pour lesquelles le niveau actuel de fertilité des sols permet des rendements justifiant leurs coûts de production qui sont relativement faibles. C'est le cas (i) du manioc qui tolère la sécheresse, n'exige qu'un seul sarclage, sans protection phytosanitaire et parfois sans labour (Connor et al., 1981 ; Cocket al., 1978) et (ii) des cultures pérennes qui sont plantées sur des parcelles à fertilité marginale en cours d'être abandonnées en jachère. Dans d'autres localités, les superficies de céréales, d'arachide (Manga et Poissongui) et d'igname (Manga) ont été élargies en cette phase de baisse de la culture cotonnière. De nouvelles techniques de maintien de la fertilité des sols n'ont été observées, à l'exception de l'extrême nord du pays où l'amendement organique a été renforcé par le compostage. Enfin, il existe dans certaines localités des modes d'accès à la terre qui sont caractérisés d'insécurisé foncière puis découragent l'investissement dans le maintien de la fertilité des sols cultivés (Abbey et al., 2002 ; Djeguéma, 2002).

²⁹ Phénomène fréquent en raison de la présence de socles rocheux dans les premières profondeurs des sols de cette zone.

1.4. Diagnostic de l'impact de l'abandon de la fertilisation minérale par certains agriculteurs sur les rendements de cultures

La situation d'abandon de la fertilisation minérale par certains paysans telle qu'observée à travers l'enquête, est un exemple type de l'expérimentation conduite à Kouvé et traitée au chapitre 4. Nous rappelons les résultats saillants de cette expérimentation qui fondent nos comparaisons et interprétations en milieu paysan. *Après 20 ans de culture avec fertilisation minérale et restitution au sol des résidus de maïs, les caractéristiques du sol ont été dégradées au point qu'une cessation de la fertilisation minérale se traduirait par des rendements de maïs ne dépassant guère 1 t ha⁻¹ (Fig.5 ; Chapitre 4). Sur les parcelles cultivées sans fertilisation minérale pendant 20 ans d'expérimentation, les caractéristiques du sol ont été dégradées au point qu'une reprise de la fertilisation minérale s'accompagnerait d'une très faible réponse du maïs à la fertilisation appliquée''*. A l'image de ces résultats, les rendements de cultures sont actuellement très faibles sur les parcelles paysannes où la fertilisation minérale a été pratiquée pendant plusieurs années (phase de production normale de coton) puis abandonnée par la suite (phase de crise cotonnière). Les rendements de maïs, de sorgho et de mil déclarés par les agriculteurs lors de l'enquête seraient d'environ 0,5-0,8 t ha⁻¹. D'autre part, sur les parcelles défrichées en cette phase de crise cotonnière puis exploitées sans fertilisation minérale, les caractéristiques du sol vont se dégrader au point qu'une reprise ultérieure³⁰ de la fertilisation améliorerait très faiblement les rendements de culture. L'adoption et l'extension de la culture de manioc dont la particularité est d'émietter le sol d'une part et d'autre part d'épuiser le sol en K à cause des exportations qui fortement élevées, exacerberaient en milieu paysan la baisse de la fertilité des sols (Howeler, 1991a ; Putthacharoen et al., 1998).

II. Indicateurs de la fertilité de sol sur des parcelles paysannes

2.1. Historique de parcelles paysannes dont les indicateurs de la fertilité de sol ont été déterminés

Le passé cultural des parcelles paysannes dont les indicateurs de la fertilité de sol ont été déterminés n'a pas pu être reconstruit de façon satisfaisante (Table 3). Les informations relatives aux apports minéraux effectués et à la durée pendant laquelle les parcelles avaient été exploitées avant les premières caractérisations de sols en 1987, sont assez douteuses. Puisque la fertilisation minérale est généralisée sur l'ensemble des parcelles exploitées par le paysan et que certaines

³⁰ Amélioration de la situation de l'agriculteur ou accès au crédit agricole

parcelles n'ont pas été défrichées par les exploitants actuels, les questions afférentes à ces informations ont eu des réponses assez imprécises. Pour certaines parcelles (W-P₁, M-P₁₀ et K-P₁₇), les informations fournies sont en général douteuses et n'ont pas été prises en compte dans nos interprétations de données. Sur ces parcelles déclarées en culture continue avec les résidus de récolte brûlés chaque année et sans apport externe de C jusqu'en 2009, les teneurs de C ont fortement augmenté. L'augmentation des teneurs de C dans ces conditions culturales ne se justifient pas au regard des observations faites en conditions contrôlés. Les teneurs de C en conditions expérimentales contrôlées ont partout diminué malgré que les résidus de récolte aient été restitués au sol (Chapitres 3 et 4) ou lorsque que la jachère de 2-3 ans a été adjointe à la rotation triennale arachide/coton/sorgho (Chapitre 5). Pour les autres parcelles paysannes dont les données ont été ici interprétées, les informations relatives au nombre d'années de jachère et à l'amendement organique qui est hors du commun sont assez précises et semblent être cohérentes à l'évolution observée des concentrations de C du sol (Table 3).

Durant la période 1987 à 2009, certaines de ces parcelles avaient été laissées en jachère pendant une période maximale de 18 ans. D'autres ont été continuellement cultivées et les résidus de récolte ont été en général brûlés. A Poissongui, toutes les parcelles étaient en culture continue durant cette période de 22 ans et les apports de fumier (difficiles à quantifier) ont été effectués chaque année sur certaines et fréquemment sur d'autres. Ces parcelles observées à Poissongui seraient également celles qui étaient exploitées assez longtemps avant les premières analyses de sol en 1987 (Table 3).

Table 3 : Historique cultural de parcelles paysannes caractérisées à partir des analyses de sol

Parcelle	Période de 1987 à 2009									Années CC		
	Etat durant les 5 dernières années									Carbone du sol		Avant1987
	2005	2006	2007	2008	2009	NbrJJ	NbrCC	Nbr.Fumier	Nbr.Engrais	ΔC (%)	δC (%)	
Waragni												
W-P2	JJ	JJ	JJ	JJ	JJ	11	11	0	?	0,31	± 0,14	>12
W-P3	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	Occasionnel	≈ 5	-0,60	± 0,14	≈ 3
W-P4 ^E	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	0	≈ 1	0,05	± 0,18	≈ 2
W-P5	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	Occasionnel	?	-0,10	± 0,09	?
W-P6	JJ	JJ	CC	CC	CC	16	6	0	?	0,02	± 0,13	>20
W-P7	CC	CC	CC	CC	JJ	1	21	18	≈ 3	-0,10	± 0,07	?
Manga												
M-P8 ^E	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	0	≈ 1	0,03	± 0,11	≈ 13
M-P9	JJ	JJ	JJ	CC	CC	4	18	0	?	0,09	± 0,10	>20
M-P11	JJ	JJ	JJ	CC	CC	18	4	0	≈ 4	-0,10	± 0,14	≈ 5
M-P12 ^E	CC	CC	JJ	CC	CC	1	21	0	?	0,05	± 0,11	>30
M-P13	JJ	JJ	JJ	JJ	CC	16	6	0	?	0,06	± 0,08	>20
M-P14	JJ	CC	CC	CC	CC	14	8	0	≈ 3	0,06	± 0,11	?

M-P15	JJ	CC	CC	CC	CC	15	7	0	≈ 5	0,40 ± 0,12	≈ 16
M-P16	JJ	JJ	CC	CC	CC	13	9	Occasionnel	≈ 3	0,67 ± 0,12	>15
Kpové											
K-P18	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	0	?	-0,80 ± 0,18	>20
K-P19	CC	CC	CC	CC	CC	2	20	0	?	-0,20 ± 0,16	≈ 3
K-P20 ^E	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	0	?	-0,00 ± 0,18	?
K-P21	CC	CC	CC	CC	CC	16	6	0	?	-0,40 ± 0,21	≈ 4
K-P22	CC	CC	CC	CC	CC	3	19	0	?	-0,00 ± 0,12	≈ 2
K-P23	CC	CC	JJ	JJ	JJ	3	19	0	?	0,17 ± 0,15	> 20
Agavé-Konda											
A-P24	CC	JJ	JJ	CC	CC	12	10	0	≈ 5	-0,20 ± 0,13	?
A-P25	JJ	JJ	JJ	JJ	CC	18	4	0	≈ 4	-0,30 ± 0,16	≈ 5
A-P26	JJ	JJ	JJ	JJ	JJ	12	10	0	?	0,04 ± 0,12	>25
A-P27 ^E	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	0	?	0,10 ± 0,14	?
A-P28 ^E	CC	CC	CC	CC	JJ	1	21	0	?	-0,10 ± 0,12	>10
A-P29	CC	CC	CC	JJ	JJ	2	20	0	?	-0,70 ± 0,23	?
A-P30	JJ	JJ	JJ	JJ	JJ	15	7	0	?	0,05 ± 0,26	≈ 5
A-P31	CC	CC	CC	CC	CC	11	11	0	?	0,37 ± 0,21	>15
Poissongui											
P-P32	CC	CC	CC	CC	CC	0	22*	22	Occasionnel	0,06 ± 0,08	>30
P-P33	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	22	?	-0,30 ± 0,08	?
P-P35	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	Fréquent	Parfois	0,07 ± 0,05	>20
P-P36	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	Fréquent	21	0,02 ± 0,03	>30
P-P37	CC	CC	CC	CC	CC	0	22	0	≈ 15	-0,10 ± 0,07	>20
P-P38	CC	CC	CC	CC	CC	0	22*	22	22	0,15 ± 0,09	>20
P-P39 ^E	CC	CC	CC	CC	CC	0	22*	0	≈ 11	-0,00 ± 0,08	>30

*JJ = Jachère, CC = en culture. NbrJJ et NbrCC sont les nombres respectifs d'années de jachère et de culture entre 1987 et 2009. Nbr.Fumier et Nbr.Engrais sont les nombres respectifs d'années où le fumier et l'engrais minéral ont été apportés entre 1987 et 2009. ΔC = variation de la concentration de C entre 1987 et 2009. δC = Variabilité de la concentration de C supposée liée à l'hétérogénéité du sol (20% de la concentration). E = parcelles en culture continue sans apports externes de C et dont la concentration de C est quasiment à l'équilibre ($\Delta C < \pm \delta C$) ; * = résidus de récolte non brûlés. Le point d'interrogation traduit une information non fournie.* Chapitre 6 : Fertilité sol en milieu paysan

2.2. Forte hypothèse d'un stock élevé et variable de C stable sur les parcelles paysannes

L'un des objectifs visés à travers la détermination des indicateurs de la fertilité de sol sur les parcelles paysannes a été de tester l'applicabilité en milieu réel des modèles d'évolution du stock de C paramétrés en station. Cette question ne peut clairement être répondue. En effet, ne disposant que de deux états de données de sol (en 1987 et en 2009), il est impossible de tester la performance des modèles lorsque l'âge d'exploitation de la parcelle avant les premières caractérisations de sol s'ajoute aux inconnues habituelles du modèle. Néanmoins, l'analyse de l'évolution des concentrations de C suppose à l'instar des résultats obtenus en station, un stock de C stable qui serait élevé puis variable sur ces parcelles paysannes. En effet, les parcelles marquées E dans la table 3 ont été continuellement cultivées entre 1987 et 2009, avec les résidus de récolte brûlés et sans apports externes de matière organique (fumier ou compost) ni pratique

de la jachère. Les entrées de C au sol ont donc été négligeables sur ces parcelles cependant que les concentrations du sol en C ont été quasi-constantes. La variation des concentrations de C (ΔC) sur ces parcelles est dans la marge de variabilité de C ($\pm \delta C$) imputable à l'hétérogénéité spatiale du sol (Table 3). Ce niveau quasi-constant des concentrations de C malgré les entrées de C au sol qui ont été négligeables traduit une très faible minéralisation de C du sol et donc révèle un stock organique plus ou moins stable. Les stocks de C de ces parcelles peuvent donc être assimilés aux stocks stables de C pour la profondeur 0-40 cm dans ces types de sol. Ils sont élevés et fortement variables d'une parcelle à une autre, 6 à 33 t C ha⁻¹. Le niveau élevé et variable de C stable ainsi soupçonné, reste concluant aux résultats obtenus en station à travers l'hydrolyse acide et le paramétrage des modèles d'évolution du stock de C du sol (Chapitre 3). D'autre part, il suppose à l'instar des résultats en station une meilleure simulation de l'évolution du stock C avec le modèle AMG qui considère un stock stable de C de près de 2/3 du stock initial total. Le modèle RothC ne considère qu'un stock stable de près de 7% du stock initial total de C et celui de HD suppose tout le stock de C du sol labile.

2.3. Evolution des indicateurs de la fertilité du sol sur les parcelles paysannes

Hormis les parcelles sur lesquelles les stocks de C du sol sont restés stables et discutés à la précédente section, les concentrations de C en 2009 ont, par rapport à celles de 1987, diminué sur la plupart des autres parcelles (Fig. 2a). Elles n'ont légèrement augmenté que sur une minorité de ces parcelles. Les parcelles (W-P2, M-P15 et K-P23) sur lesquelles la concentration de C a légèrement augmenté sont riches en argile (15 à 20%) et sont parmi les parcelles qui avaient été laissées en jachère pendant une période relativement longue (11 à 18 ans) (Table 3). De plus, ces parcelles avaient en 1987 des concentrations de C déjà faibles. Sur les parcelles où les concentrations de C étaient relativement élevées en 1987, la pratique de la jachère n'a pas empêché la baisse des concentrations de C. Ces observations sont analogues aux résultats obtenus en station où l'effet de la jachère n'a été perçu sur les concentrations de C du sol qu'après plus une dizaine années d'exploitation (Chapitre 5). Les parcelles paysannes observées à Poissongui avaient les plus faibles concentrations de C en 1987 qui sont restées presque constantes jusqu'en 2009 avec les apports de fumier effectués. Pour toutes les parcelles, le rapport C/N a augmenté, indiquant un stock de matière organique du sol de plus en plus appauvri en N (Fig. 2c et b). De la même manière, la somme des bases échangeables et les concentrations du sol en P assimilable ont baissé entre 1987 et 2009, traduisant une dégradation généralisée des indicateurs de la fertilité des sols sur ces parcelles paysannes.

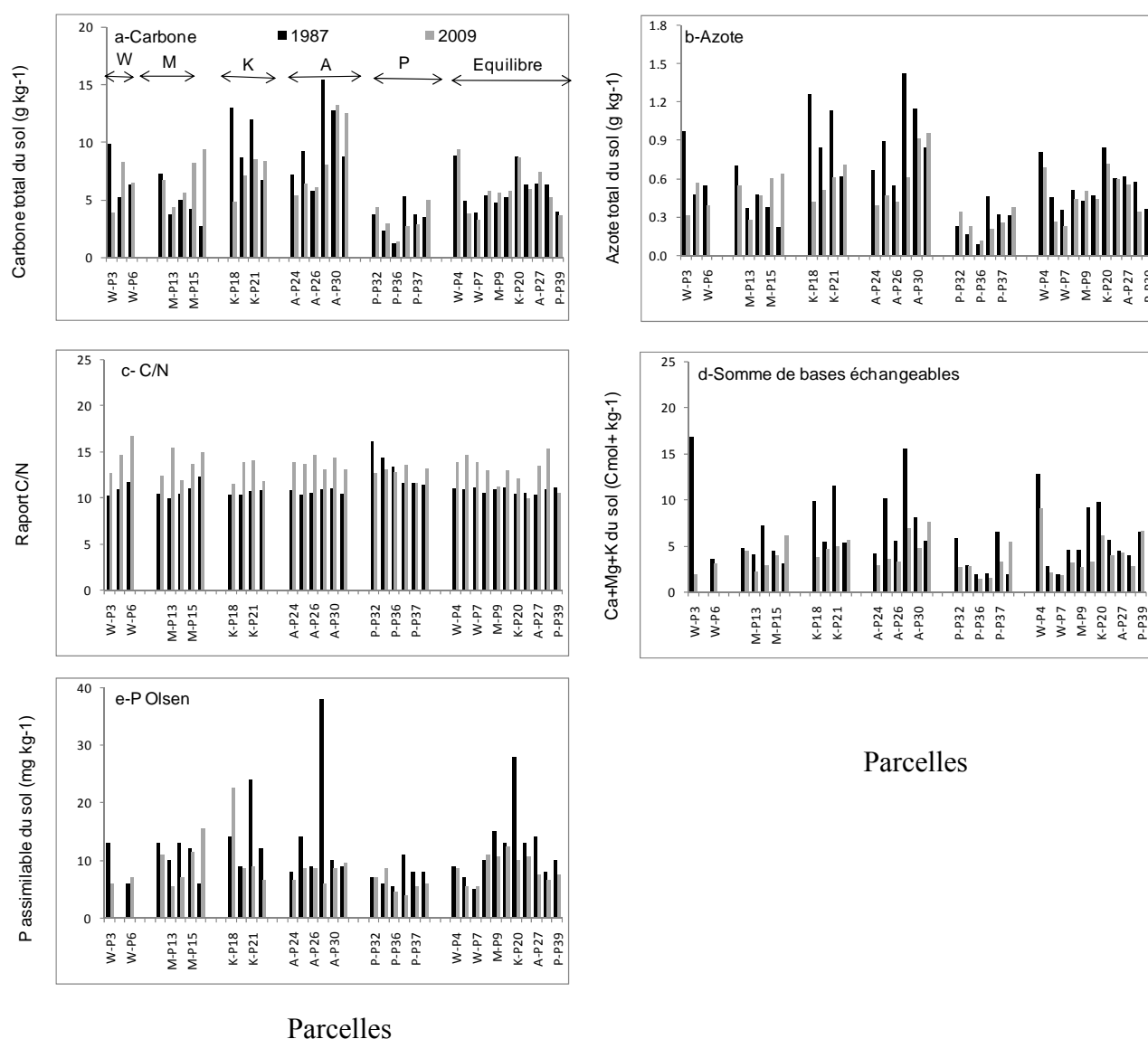


Figure 2 : Evolution des concentrations de C et de nutriments sur des parcelles paysannes. W = Waragni, M = Manga, K = Kpové, A = Agavé-Konda, P = Poissongui, Equilibre = en culture continue sans apports externes de C ni pratique de la jachère

Conclusion

La dégradation des indicateurs de la fertilité du sol a été aussi forte sur les parcelles paysannes que les sites d'expérimentations en station. La matière organique du sol devient de plus en plus pauvre en N et les taux des autres éléments minéraux ont baissé sur ces parcelles paysannes. Les pratiques culturales actuellement en place en milieu paysan sont de nature à exacerber cette dégradation de la fertilité des sols cultivés. En effet, la baisse de la culture cotonnière a été traduite par la diminution de 15 à 60% du taux d'agriculteurs appliquant des engrais minéraux et l'adoption/extension des cultures peu sensibles aux aléas climatiques et nécessitant des faibles intrants agricoles. Certaines de ces cultures (dont le manioc) émiettent le sol et l'épuisent en K.

Conclusion générale, insuffisances et perspectives

1. Objectif et démarche

L'objectif de l'étude a été d'analyser l'évolution de la fertilité du sol sous différentes pratiques culturales en zone cotonnière du Togo. L'étude a utilisé (i) des données de sols et de rendements de cultures relatives aux expérimentations conduites en conditions contrôlées pendant 20-40 ans sur les points de recherche situés dans différentes zones agro-écologiques du pays, (ii) des données de sols observées dans un intervalle de temps de 22 ans sur des parcelles paysannes dans cinq villages (conditions non-contrôlées) qui sont également situés dans les différentes zones agro-écologiques et (iii) des données d'enquêtes conduites auprès des agriculteurs dans les villages où les caractérisations de sol en parcelles paysannes ont été effectuées. Il s'agit des points de recherche de Kouvé, Elavagnon, Dalanda et Toaga et les villages de Kpové, Agavé, Waragni, Manga et Poissongui. Les taux du sol en C et N totaux, le complexe échangeable, la granulométrie et le pH ont été déterminés au moins quatre fois durant la phase de conduite de chacune des expérimentations de longue durée en conditions contrôlées et deux fois sur les parcelles paysannes. Dans le cas des expérimentations conduites à Elavagnon et Dalanda et sur les échantillons de sol prélevés en 2007 uniquement, la quantité de C résistant à la minéralisation a été en plus évaluée par hydrolyse acide. La vitesse de minéralisation de C, en fonction de sa composition isotopique, a été d'autre part quantifiée par incubation dans le cas d'une nouvelle défriche à Kolokopé. L'analyse des données a consisté à identifier dans un premier temps les modèles décrivant mieux l'évolution du stock de C de ces sols tropicaux. A cet effet, trois modèles de complexité variable ont été testés en les appliquant aux données d'expérimentations conduites à Elavagnon et Dalanda. Il s'agit des modèles de Hénin-Dupuis (HD), AMG et RothC qui considèrent respectivement le stock de C en 1, 2 et 5 compartiments. Ensuite et pour les expérimentations conduites à Kouvé et Toaga, le modèle d'évolution du stock de C qui s'est avéré plus performant a été couplé à des outils d'analyse tels que le modèle QUEFTS et le bilan minéral apparent afin d'analyser puis explorer l'effet de pratiques culturales sur la potentialité du sol à fournir dans le long terme des nutriments aux cultures et sur l'évolution des indicateurs de la fertilité du sol. Les pratiques culturales concernées par les diverses expérimentations sont : les rotations culturales avec et sans légumineuses à Elavagnon, l'alternance de deux ou trois années consécutives de jachère à la rotation culturale à Toaga et des doses/formulations de fertilisants minéraux à Kouvé et à Dalanda. L'évolution de la fertilité du sol telle que observée sur les

points de recherche a été confrontée à celle observée sur des parcelles paysannes et le contexte actuel de gestion de la fertilité des sols en milieu paysans a été décrit à travers les résultats d'enquêtes.

2. Principaux résultats

2.1. Effet de pratiques culturales sur l'évolution des rendements de cultures

Les pratiques culturales testées³¹ ici n'ont pas maintenu la production dans le long terme. Les rendements de cultures qui étaient relativement élevés à la défriche ont fortement baissé par la suite. A Elavagnon et Dalanda, bien que la fertilisation minérale a été continuellement appliquée à la dose recommandée par la recherche (RR), les rendements initiaux de coton-graine et de céréales de 1,5-2 et 2-3 t ha⁻¹ respectivement ont baissé pour ne représenter qu'environ 1 t ha⁻¹ après les 20 premières années d'expérimentations (Chapitre 3 et Fig.1). Cette baisse de rendements de cultures n'a pas été atténuée lorsque la dose RR d'engrais NPK a été augmentée de moitié (1.5RR). Les rendements de coton-graine et de maïs avec les doses 1.5RR et RR ont été assez comparables, aussi en sols ferralitiques à Dalanda qu'en terre de barre à Kouvé (Chapitres 3 et 4). Dans le cas de l'expérimentation conduite pendant 20 ans à Kouvé et avec restitution au sol de la paille de maïs, les rendements de coton-graine et de maïs ont été de $2,0 \pm 0,7$ et $2,2 \pm 0,8$ t ha⁻¹ respectivement, aussi bien pour la dose RR que pour 1.5RR. Par rapport au traitement sans fertilisation, la production de coton-graine, de sorgho et de maïs a été accrue de 68, 128 et 38% respectivement lorsque la fertilisation a été effectuée (Chapitre 3). A Toaga, l'alternance de 2-3 années consécutives de jachère-fertilisée à la rotation triennale arachide/coton/sorgho n'a pas non plus amélioré les rendements de culture comparativement à la culture continue, mais tend à stabiliser la production dans le long terme (Chapitre 5 et Fig.1). La production totale durant 40 ans d'expérimentation a été ainsi plus élevée en culture continue en raison du maintien périodique de la parcelle hors culture dans le cas des systèmes incluant 2 ou 3 années de jachère.

³¹ Différentes rotations culturales, présence de la jachère de coultre durée dans la rotation culturale et différentes doses de fertilisation minérale avec restitution au sol des résidus de récolte.

2.2. Evolution des indicateurs de la fertilité du sol

La baisse observée des rendements de cultures a été fortement associée à la dégradation de certains indicateurs de la fertilité du sol. Les concentrations du sol en C et N totaux ont baissé dans le cas de toutes les expérimentations puis l'acidification du sol et la baisse des concentrations de Ca et Mg ont été prononcées pour des doses élevées de fertilisation minérale. Dans les 20 premiers cm du sol, les stocks initiaux de C d'environ 15 t ha^{-1} à Elavagnon et Dalanda, 17 t ha^{-1} à Toaga et 39 t ha^{-1} à Kouvé, ont fortement baissé au cours des premières années qui ont précédé la défriche pour atteindre un équilibre après seulement moins de 15 ans de culture. Cette baisse du stock de C a été très peu influencée par la quantité de C retournant au sol. A Kouvé, bien que les entrées de C au sol ont été quasi-nulles sur les parcelles labourées sans être ensemencées et plus faibles sur les parcelles non-fertilisées ($\approx 0,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) que sur celles fertilisées ($\approx 1,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), la baisse du stock de C a été similaire pour tous les traitements. Ce résultat souligne que la baisse du stock de C de ces sols tropicaux est plus une question de forte minéralisation en raison des changements pédoclimatiques induits par le défrichement et le labour qu'une question de quantité de C retournant au sol. De la même façon, la baisse du stock de C à Elavagnon a été analogue pour toutes les rotations culturales bien que les entrées de C au sol, à travers la paille de céréales retenue sur la parcelle, ont été plus élevées pour la rotation incluant la variété plus productive de sorgho. A Toaga et comparativement à la culture continue, le taux de C du sol pour les traitements incluant la jachère avec restitution au sol de la biomasse ne s'est légèrement amélioré qu'après les premières années où la baisse devient moins forte et essentiellement lorsque la jachère a été fertilisée.

Les baisses observées du stock de C du sol ont été mieux décrites avec le modèle AMG. Le modèle RothC et notamment celui de HD tendent à sous-estimer le stock de C à l'équilibre (Chapitre 3 et Fig. 4). Le modèle AMG a été paramétré sur l'ensemble des sites avec un coefficient de minéralisation de la fraction labile de C qui varie entre 0,15 et 0,24 et un stock de C stable variant entre 6 et 15 t ha^{-1} . Ce stock de C stable représente 33 à 50% des stocks à la défriche à Kouvé et Toaga puis 60 à 67% des stocks à la mise en place³² des expérimentations à Elavagnon et Dalanda. La quantité de C du sol ayant résisté à l'hydrolyse acide représente près de 30% des stocks à la mise en place des expérimentations à Elavagnon et Dalanda et est ainsi plus faible que le stock de C stable ayant permis de décrire l'évolution

³² Quelques années après la défriche

du stock de C avec le modèle AMG. Ces résultats, aussi à travers la simulation que par hydrolyse acide, révèlent un stock élevé de C stable dans ces sols tropicaux. Ce niveau élevé du stock de C stable est l'une des principales causes de leur fragilité. Après les premières années de culture, la contribution de la matière organique du sol à l'alimentation minérale (N et P) des cultures est faible ; puisque l'essentiel du stock de C du sol en cette phase se minéralise faiblement. La vitesse de minéralisation de C du sol telle que évaluée par incubation, a été plus faible pour les échantillons de sol riches en C provenant de la photosynthèse des plantes à C₃ (ligneux essentiellement). Ce résultat est cohérent avec le niveau plus élevé du stock de C stable simulé à Elavagnon et à Kouvé (10-15 t C ha⁻¹ respectivement) qui sont en régions forestières et pour lesquels les taux d'argile sont relativement plus élevés (Chapitre 2). Pour les sites de Toaga et de Dalanda qui sont situés en régions de savanes avec de faibles taux d'argile, les stocks simulés de C stable ont été assez faibles (7 à 8 t C ha⁻¹ respectivement).

Les explorations au moyen des versions paramétrées du modèle AMG montrent que, rien qu'à travers des apports externes de matière organique, il serait difficile de maintenir le stock de C de ces sols tropicaux à des niveaux optimisant la réponse des cultures à la fertilisation minérale. Des amendements organiques effectués au cours des premières années qui précèdent la défriche auront des effets très limités sur le stock C du sol. Effectués dans le long terme, ces amendements peuvent améliorer le stock de C du sol mais nécessiteraient des apports très élevés, environ 3,5 t C ha⁻¹ an⁻¹ pendant 15-20 ans. De telles interventions suscitent d'une part des questions de faisabilité en raison des moyens limités des agriculteurs et de rareté par endroit du matériel (Chapitre 6) puis d'autre part des problèmes de rentabilité économique de l'opération. Les explorations ont par ailleurs montré l'intérêt de fractionner les amendements organiques dans ces sols qui sont caractérisés par des faibles taux d'argile. Les pratiques de non-labour et l'atténuation des températures du sol à travers le paillage par exemple, méritent d'être couplées aux amendements organiques fractionnés afin d'optimiser les interventions. Le semis direct sous couverture végétale incarne ces conditions et serait une des options potentielles pour gérer la fertilité organique de ces sols.

Le stock de N a également baissé dans le cas de toutes les expérimentations et cette baisse n'a pas été atténuée lorsque la dose recommandée d'engrais NPK a été augmentée de moitié (Chapitre 4). Dans le cas de l'expérimentation conduite en terre de barre à Kouvé, bien que le bilan minéral apparent suppose des améliorations de stock de N lorsque les cultures ont été fertilisées, la baisse du stock de N pour ces traitements a été quasi-similaire à celle du

traitement sans fertilisation et sur la parcelle labourée sans être ensemencée ni fertilisée. La baisse du stock de N a été fortement associée à celle du stock de C ($r = 0,93$). Ces résultats d'une part traduisent des pertes N autres que les exportations à travers la récolte puis soulignent d'autre part que la fertilisation minérale induirait des effets très limités sur le stock de N de ces sols dès lors que la baisse du stock de C ne serait pas maîtrisée. Par rapport aux cinq premières années après la défriche de la terre de barre, sa potentialité à fournir N aux cultures telle que calculée avec le modèle QUEFTS a baissé de 38-49% dans le long terme, sans différence nette sur les parcelles fertilisées et non-fertilisées.

La concentration du sol en P total a été presque maintenue à travers les pratiques culturales expérimentées en terre de barre à Kouvé et en sol hydromorphe à Toaga. Elle a légèrement augmenté pour toutes les rotations culturales en sol ferrugineux à Elavagnon. En sol ferralitique à Dalanda par contre, le stock de P total a en moyenne baissé de $42 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, lorsque la fertilisation minérale a été effectuée ou non. S'agissant de la concentration de P assimilable, elle a baissé sur tous les points de recherche, sauf en sol hydromorphe à Toaga. En terre de barre par exemple, les concentrations de P assimilable sont en moyenne passées de 80 à 25 mg P kg^{-1} en moins de 10 ans de culture (Chapitre 4 et Fig. 4c). Ainsi, la potentialité du sol à fournir P aux cultures telle que calculée avec le modèle QUEFTS a dans le long terme baissé de 25-59% par rapport aux cinq premières années qui ont précédé la défriche.

La concentration du sol en K-éch a été maintenue avec la dose RR d'engrais NPK en conditions de deux saisons agricoles par an. En terre de barre à Kouvé où le maïs a été cultivé à la première saison, le cotonnier à la seconde et chaque culture fertilisée à la dose RR d'engrais, la concentration du sol en K-éch a été pendant 20 ans maintenue à son niveau initial (Chapitre 4 et Fig. 5d). Elle a très légèrement augmenté pour la dose 1.5RR d'engrais tandis qu'elle a baissé de 82 et 75% par rapport à son niveau initial sur la parcelle labourée sans être ensemencée ni fertilisée et en cultures sans fertilisation, respectivement. En sol hydromorphe à Toaga où la saison agricole est par contre unique, la concentration de K-éch avec la dose RR d'engrais a baissé de 60% par rapport à son niveau initial après 40 ans de culture continue. De la même manière, le stock de K-éch a été maintenu à Elavagnon où existent deux saisons agricoles alors qu'il a en moyenne baissé de $6 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ à Dalanda où la saison agricole est unique. Le maintien de la concentration de K avec la dose RR d'engrais en zones à deux saisons agricoles est du à la fréquence des apports et n'exclut en aucun cas de pertes par lixiviation et érosion, telles que évidentes sur la parcelle labourée sans être ensemencée en terre de barre. La CEC qui a été certes élevée à la défriche en terre de barre ($5,7 \text{ Cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$),

a rapidement baissé pour atteindre après sept ans des niveaux de $2,8 \text{ Cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ qui sont comparables aux niveaux quasi-constants pendant 40 ans de la CEC en sol hydromorphe à Toaga (Chapitre 5).

Les concentrations du sol en Ca et Mg ont baissé sur tous les sites et cette baisse a été prononcée pour la dose élevée d'engrais NPK. En terre de barre à Kouvé, la baisse des concentrations de Ca et Mg avec la dose 1.5RR d'engrais NPK dépasse respectivement de 20 et 40% la baisse en absence de la fertilisation minérale (Chapitre 4). Par rapport au niveau initial, la baisse moyenne respective des concentrations de Ca et Mg a été en moyenne de 36 et 40% en sol ferrugineux à Elavagnon, 25 et 45% en sol ferralitique à Dalanda et de 52 et 60% en sol hydromorphe à Toaga. La baisse prononcée des concentrations de Ca et Mg, cependant que celle de K-éch est maintenue pour la dose RR ou 1.5RR d'engrais sur les sites à deux saisons agricoles, a été traduite par un déséquilibre entre les bases échangeables après seulement quelques années de culture. Le ratio Mg/K qui était de 6 à la défriche de la terre de barre est tombé à 2,2 et 1,7 lorsque les doses RR et 1.5RR d'engrais NPK avaient été respectivement appliquées. Parce que la baisse des concentrations de Ca et Mg a été associée à celle du pH ($r = 0,36$), l'acidification du sol a été également prononcée pour la dose élevée d'engrais NPK. La baisse en terre de barre du pH a été trois fois plus élevée lorsque la dose 1.5RR d'engrais NPK a été appliquée qu'en absence de la fertilisation. Elle a été assez modérée avec la dose RR d'engrais comme sur les autres sites d'expérimentations. Ainsi, bien que le stock de P total a été presque maintenu sur la plupart des sites, l'acidification et la baisse du stock de C ont induit la baisse de la potentialité des sols à en fournir aux cultures. Les explorations avec le modèle QUEFTS montrent que, l'acidification du sol est l'un des principaux facteurs de la chute des rendements de maïs en terre de barre. A travers les résultats de la présente étude, il n'apparaît aucun intérêt d'apporter dans ces sols P et K au-delà des doses recommandées par la recherche. La combinaison des apports de Ca et Mg aux apports de N, P et K à des doses recommandées préserverait mieux leur fertilité minérale.

L'un des objectifs de cette étude a été de tester en milieu réel la performance des modèles d'évolution du stock de C paramétrés en conditions contrôlées. Ce test n'a été possible en raison de la méconnaissance de l'âge d'exploitation de ces parcelles paysannes avant les premières caractérisations de sols et ceci pour deux états de données disponibles. Néanmoins, l'existence d'un stock élevé de C stable tel que observé en conditions contrôlées a été soutenue par un stock d'équilibre de C élevé sur ces parcelles paysannes. D'une manière générale, les indicateurs de la fertilité du sol sur les parcelles paysannes sont dégradés. Par

rapport aux analyses de sols effectués en 1987, la matière organique du sol devient de plus en plus pauvre en N et la concentration des autres éléments minéraux a baissé. La baisse de la culture de coton au cours de ces dernières années a été traduite par la diminution du taux d'agriculteurs appliquant des engrais minéraux, notamment dans les zones où la pratique de la jachère est encore relativement possible et où le niveau actuel de fertilité des sols permet quelque production sans fertilisation. A l'exception du Nord du Togo où l'amendement organique a été renforcé par le compostage en cette période de crise cotonnière, de nouvelles techniques de maintien de la fertilité du sol n'ont pas été rapportées. Certains agriculteurs ont adopté et/ou élargi les superficies des cultures peu risquées en raison de leur faible sensibilité aux aléas climatiques et pour lesquelles le niveau actuel de fertilité des sols permet des rendements pouvant justifier leurs coûts de production relativement faibles. C'est l'exemple du manioc au Sud-est de la région des Plateaux. Il existe dans certaines zones des modes d'accès à la terre qui sont caractérisés d'insécurité foncière et de partage proportionnel de la production entre l'exploitant agricole et le propriétaire foncier. Ces pratiques démotivent les exploitants agricoles pour investir dans le maintien de la fertilité de sols dont ils ne sont pas propriétaires.

3. Insuffisances et perspectives

3.1. Insuffisances

Comme toute étude basée sur de données existantes, les résultats de la présente étude ont été assujettis à la nature et au type de données disponibles. Nos résultats ne permettent pas d'indexer une pratique culturale déjà expérimentée en zone cotonnière du Togo et qui maintiendrait dans le long terme la production et la fertilité de ces sols. Les résultats ont servi de bases scientifiques aux raisonnements qui ont conclu sur la proposition de nouvelles pratiques culturales qui méritent d'être expérimentées. Par ailleurs, le modèle AMG qui s'est avéré assez performant pour décrire l'évolution du stock de C de ces sols n'intègre pas les paramètres environnementaux dont les effets ne peuvent, en aucun cas, être absents dans le processus d'évolution de la matière organique du sol. Le modèle RothC qui intègre ces paramètres a été peu performant à cause probablement du fait que les fonctions de température et d'humidité du sol telles que paramétrées en zone tempérée et utilisées dans le modèle sont inadéquates avec les conditions tropicales. Un reparamétrage de ces fonctions de température et d'humidité en zone tropicale s'avère nécessaire. Une dernière insuffisance est l'utilisation dans le cas des expérimentations de longue durée des données synchroniques de sols observées à des points non repérés pour paramétrer les modèles, cependant que les paramètres du sol sont fortement variables.

3.2. Perspectives

Afin de palier aux manquements ci-dessus énumérés et d'étayer les informations relatives à la dynamique de la matière organique du sol en zone tropicale, nous avons installé à partir de 2010 une nouvelle expérimentation à Kolokopé (Annexe). A travers ce dispositif, les effets des pratiques culturales dont le semis direct sous couverture végétale et les apports de fumier sont en cours de comparaison. Les données de températures et d'humidité sont en train d'être enregistrées sous ces différentes pratiques culturales. Elles serviront à paramétrer en conditions tropicales les fonctions de température et d'humidité du sol telles qu'elles régissent la dynamique de la matière organique du sol. A la mise en place du dispositif expérimental, le taux et la composition isotopique de C du sol ont été déterminées à partir des points repérés de prélèvement d'échantillons de sol. Quelques années plus tard, ces caractérisations de sol seront reprises sur la fraction soluble de la matière organique du sol.

Les résultats de cette étude ont également mis en exergue un stock élevé de C stable. Son origine et ses propriétés agronomiques devront être précisées en associant les techniques de détermination de C stable à l'analyse isotopique ou à la datation. Le test de performance en milieu réel des modèles d'évolution du stock de C paramétrés en conditions contrôlées n'a pu être effectué. Un troisième état de données de sol sur les parcelles paysannes permettra d'y répondre. Enfin, les techniques culturales associant les apports de Ca et Mg à ceux des macroéléments sont des options à explorer.

Références citées

- Abad, A., Lloveras, J., Michelena, A., 2004. Nitrogen fertilization and foliar urea effects on durum wheat yield and quality and on residual soil nitrate in irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* 87, 257–269.
- Abbey A., Adourahim A., 2002. *Facteurs de choix des cultures dans les bas-fonds dans la Région des Savanes au Togo*. Rapport d'étude, UL/ESA, 54 p.
- Adjoussi, P., 2000. *Changement climatique global : Evaluation de l'évolution des paramètres climatiques au Togo*. Mémoire de Maîtrise. Université de Lomé, 119 p.
- AFNOR (Association Française de Normalisation), 1987. *Qualité des sols. Recueil de Normes Françaises*. Paris, 135 p.
- Al-Kaisi, M.M., Yin, X., Licht, M.A., 2005. Soil carbon and nitrogen changes as affected by tillage system and crop biomass in a corn–soybean rotation. *Applied Soil Ecology* 30, 174–191.
- Alvarez, C.R., Alvarez, R., Grigera, M.S., Lavado, R.S., 1998. Associations between organic matter fractions and the active soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 767-773.
- Alvey, S., Bagayoko, M., Neumann, G., Buerkert, A., 2001. Cereal/legume rotations affect chemical properties and biological activities in two West African soils. *Plant and Soil* 92, 45–54.
- Amato, M., Ladd, J. N., 1992. Decomposition of ^{14}C -labelled glucose and legume material in soils. Properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 24, 455-464.
- Amelung W., Zech W., Zhang X., Follett R.F., Tiessen H., Knox E., Flach K.W., 1998. Carbon, nitrogen, and sulfur pools in particle-size fractions as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 172–181.
- Amelung, W., Zech, W., 1999. Minimisation of organic matter disruption during particle-size fractionation of grassland epipedons. *Geoderma* 92, 73–85.

- Anderson, E.L., 2002. Tillage and N-fertilization effects on maize root-growth and root-shoot ratio. *Plant Soil*, 108, 245-251.
- Anderson, J.U., 1963. An improved pretreatment for mineralogical analysis of samples containing organic matter. *Clays and Clay Minerals* 10, 380–388.
- Andrén, O., Kätterer, T., Karlsson, T., 2004. ICBM regional model for estimations of dynamics of agricultural soil carbon pools. *Nutr. Cyc.l Agroecosyst.* 70, 231–239.
- Andrist-Rangel, Y., Simonsson, M., Andersson, S., Öborn, I., Hillier, S., 2006. Mineralogical budgeting of potassium in soil: A basis for understanding standard measures of reserve potassium. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 1969, 605-615.
- Andriulo, A., Mary, B., Guerif, J., 1999. Modeling soil carbon dynamics with cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19, 365–377.
- Angers, D.A., Peasant, A., Vigneux, J., 1992. Early cropping induced changes in soil aggregation, organic matter, and microbial biomass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 115–119.
- Arrouays, D., Balesdent, J., Mariotti, A., Girardin, C., 1995. Modeling organic carbon turnover in cleared temperate forest soils converted to maize cropping by using ^{13}C natural abundance measurements. *Plant Soil* 173,191–196.
- Badiane, A., Faye A., Yamoah, C.F., Dick, R.P., 2001. Use of compost and mineral fertilizers for millet production by farmers in the semiarid region of Senegal. *Biological Agriculture and Horticulture*, 19 (3), 219-230.
- Balbino, L.C., Brossard, M., Leprun, J.C., Bruand, A., 2002. Mise en valeur des Ferralsols de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques : une étude bibliographique. *Etude et Gestion des sols*, Vol., 9, 2, 84-104.
- Balesdent, J., Balabane M., 1996. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 28 (9), 1261-1263.
- Balesdent, J., Balabane, M., 1992. Maize root-derived soil organic carbon estimated by ^{13}C abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, 24, 97–101.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53 (3-4), 215-230.
- Balesdent, J., Mariotti, A., Guillet B., 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 25-30.

- Balesdent, J., Petraud, J.P., Feller, C., 1991. Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des sols. *Science du Sol*, 29 (2), 95-106.
- Barrios, E., Kwesiga, F., Buresh, R.J., Sprent, J.I., 1997. Light fraction soil organic matter and available nitrogen following trees and maize. *Soil Science Society of America Journal*, 61, pp 826-831.
- Barriuso, E., Portal, J.M., Andreus, F., 1987. Cinétique et mécanisme de l'hydrolyse acide de la matière organique d'un sol humifère de montagne. *Can. J. Soil Sci.* 67, 647–658.
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., Kimetu, J., 2006. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agric. Syst.* 97, 13 – 25.
- Bationo, A., Kimetu, J., Ikerra, S., Kimani, S., Mugendi, D., Odendo, M., Silver, M., Swift, M.J., Sanginga, N., 2004. The African network for Soil Biology and Fertility: New challenges and opportunities. Managing Nutrient Cycles to Sustain Soil fertility in Sub-Saharan Africa. *Academy Science Publisher, Nairobi*, pp.1-23.
- Bationo, A. and Buerkert, A., 2001. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosyt.* 61, 131–142.
- Becquer, T., Pétard, J., Duwig, C., Bourdon, E., Moreau, R., Herbillon, A.J., 2001. Mineralogical, chemical and charge properties of Geric Ferralsols from New Caledonia. *Geoderma*, 103, 291-306.
- Bekunda, M.A., Bationo, A., Ssali, H., 1997. Fertility management in Africa: A review of selected research trials, in: Buresh, R.T., Sanchez, P.A., Calhoun, F., (Eds.), Replenishing soil fertility in Africa. *SSSA Special publication, Soil Sc. Soc. Am.* 51, pp. 63-79.
- Berenguer, P., Santiveri, F., Boixadera, J., Lloveras, J., 2008. Fertilisation of irrigated maize with pig slurry combined with mineral nitrogen. *Europ. J. Agronomy*, 28, 635-645.
- Berntsen, J., Petersen, B.M., Olesen, J.E., 2006. Simulating trends in crop yield and soil carbon in a long-term experimental—effects of rising CO₂, N deposition and improved cultivation. *Plant and Soil*, 287, 235–245.
- Berzelius, J.J., 1839. *Lehrbuch der Chemie*. Translated from Swedish to German by Wöhler. vol. 8, pp. 11–16 and 384–341.

- Bezdicek, D.F., Papendick, R.I., Lal, R., 1996. Importance of soil quality to health and sustainable land management, in: Doran JW, Jones AJ (Eds.), *Methods of assessing soil quality*. Soil Science Society of America, 49, pp 1–18.
- Bohn, H., McNeal, B.L., O'Connor, G.A., 1985. *Soil Chemistry*. Wiley, New York.
- Bossuyt, H., Six, J., Hendrix, P.F., 2002. Aggregate-Protected Carbon in No-tillage and Conventional Tillage Agroecosystems Using Carbon-14 Labeled Plant Residue. *Soil Sci. Soc. J.*, 66, 1965-1973.
- Bostick, M.W., Bado, V.B., Bationo, A., Soler, C.T., Hoogenboom, G., Jones, J.W., 2007. Soil carbon dynamics and residue yields of cropping systems in the Northern Guinea Savannah of Burkina Faso. *Soil and Tillage Research*, 93, 138–151.
- Boulaine J., 1995. Quatre siècles de fertilisation. *Etude et Gestion des sols*, 2-3, 201-208.
- Bruckert S., 1979. Séparation des complexes organo-minéraux et des matières organiques libres par tamisage dans l'eau. Application aux sols à complexes argilo-humiques floculés. *Ann. Univ. Besançon, 3ème sér. Biol. Vég.* 20, 3-7.
- Bruesh, R.J. and Tian, G., 1998. Soil improvement by trees in sub-Saharan Africa. *Agroforestry system*, 38, 51-76
- Burns, A.F. and Barber, S.A., 1961. The effect of temperature and moisture on exchangeable potassium. *Soil Sci Soc Am J* 25, 349–352.
- Bussiere, F., Cellier, P., 1994. Modification of the soil temperature and water content regimes by a crop residue mulch: experiment and modeling. *Agric. Forest Met.* 68, 1–28.
- Buurman, P., 1996. Use of soil analyses and derived properties, in: Buurman, P., van Lagen, B., Velthorst, E.J. (Eds.), *Manual for Soil and Water Analysis*. Backhuys, Leiden, Netherlands, pp. 291-314.
- Campbell, C.A., Biederbeck, V.O., McConkey, B.G., Curtin, D., Zenter, R.P., 1999. Soil quality -effect of tillage and fallow frequency. Soil organic matter quality as influenced by tillage and fallow frequency in a silt loam in southwestern Saskatchewan. *Soil Biochem.* 31, 1–7.
- Cerri, C., Feller, C., Balesdent, J., Victoria, R., Plenecassagne, A., 1985. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *Acad. Agric. Fr. Vol.* 9, 423-428.

- Ciesielski, H. and Sterckeman, T., 1997. A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. *Agronomie*, 17, 9-16
- Chabalier, P.F., 1976. *Contribution à la connaissance du développement de l'azote du sol et de l'azote engrais dans un système sol-plante. Résultats d'essais portant principalement sur les cultures de riz et de maïs en sols ferrallitiques de Bouaké et Gagnoa (Côte d'Ivoire)*. Thèse de doctorat-ingénieur, faculté des sciences de l'Université d'Abidjan, 131p + annexes.
- Chefetz, B., Tarchitzky, J., Deshmukh, A., Hatcher, P. G., Chen, Y., 2002. Structural characterization of soil organic matter and humic acids in particle-size fractions of an agricultural soil. *Soil Science Society American Journal*, 66, 129-141.
- Chikowo, R., Corbeels, M., Titttonell, P., Vanlauwe, B., Whitbread, A., Giller, K.E., 2008. Aggregating field-scale knowledge into farm-scale models of African smallholder systems: Summary functions to simulate crop production using APSIM. *Agricultural Systems*, 97, 151–166.
- Cissé, L., 1986. *Etude des effets d'apport de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal*. Thèse de Doctorat en sciences agronomiques, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 184 p.
- CNUCED, 2008. Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement. Unctad Stat-Rapports.
- Cock, J.H. and Howeler, R.H., 1978. The ability of cassava to grow on poor soils, in: Jung, G.A., (Ed.), *Crop tolerance to suboptimal land conditions*, ASA special publication, 32, Am. Soc. of Agr. Wisconsin. pp145-154.
- Coleman, K., Jenkinson D.S., 2005. RothC-26.3. *A model for the turnover of carbon in soil. Manuel*
- Collins, H.P., Elliott, E.T., Paustian, K., Bundy, L.G., Dick, W.A., Huggins, D.R., Smucker, A.J.M., Paul, E.A., 2000. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 157-168
- Connor, D.J., Cock, J.H., Parra, G.E., 1981. Response of cassava to water shortage. I. Growth and yield. *Field Crop Res.* 4, 181-200.

- Cox, J.C., Cherney, D.J.R., 2001. Rowspacing, plant density and nitrogen effects on corn silage. *Agron. J.* 93, 597–602.
- Craufurd, P.Q., Prasad, P.V.V., Summerfield, R.J., 2002. Dry matter production and rate of change of harvest index at high temperature in peanut. *Crop Sci.* 42, 146–151.
- Dabin, B., 1956. *Considération sur l'interprétation agronomique des analyses de sols en pays tropicaux*. Paris: 6e Congr. Intern. Sci. Sol., IV, 403-409.
- Dabin, B., 1968. *Sur une méthode d'analyse du phosphore dans les sols tropicaux*. Services Scientifiques Centraux, Bondy (France), 13544
- De Freitas, P.L., Blancaneaux, Ph., Moreau, R., 1998. Caractérisation structurale de sols des Cerrados Brésiliens (Savanes) sous différents modes d'utilisation. *Etude et Gestion des Sols*, 5, 2, 93-105
- De Kimpe, C., 2003. *Gestion des sols pour une agriculture durable*. Mém. Acad. Nationale Arts, Lettres Sciences, pp 205-215.
- de Ridder, N., Breman, H., van Keulen, H., Stomph, T.J., 2004. Revisiting a 'cure against land hunger': soil fertility management and farming systems dynamics in the West African Sahel. *Agric. Syst.* 80, 109–131.
- de Rouw, A., Jean-Louis Rajot, J-L., 2004. Nutrient availability and pearl millet production in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 249-262.
- Deen, W., Kataki, P.K., 2003. Carbon sequestration in a long-term conventional versus conservation tillage experiment. *Soil and Tillage Research*, 74, 143-150.
- Diels, K., Valauwe, B., Van Der Meersch, M.K., Sanginga, N., Merchx, R., 2004. Long-term soil organic carbon dynamics in a subhumid tropical climate: ¹³C data in mixed C3/C4 cropping and modeling with RothC. *Soil Biology and Biochemistry* 36, 1739–1750.
- Djéguéma, K., 2002. *Les déterminants de l'adoption du paquet maïs/engrais/mucuna dans le Sud-Est de la Région Maritime*. Mémoire d'Ingénieur Agronome, Ecole Supérieure d'Agronomie, Université de Lomé, 102 p.
- Dobermann, A., Cassman, K.G., Sta Cruz, P.C., Adviento, M.A.A., Pampolino, M.F., 1996a. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive,

- irrigated rice systems II. Effective soil K-supplying capacity. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 46, 11–21.
- Dominy, C.S., Haynes, R.J., 2002. Influence of agricultural land management on organic matter content, microbial activity and aggregate stability in the profiles of two Oxisols. *Biol. Fertil. Soils*, 36, 298-305.
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and assessing soil quality, in: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publication Number 35, Madison, WI, USA. pp 3–21
- Drechsel, P., Steiner, K.G., Hagedorn, F., 1996. A review on the potential of green fallow in Rwanda. *Agroforestry System*, 33, 109-136
- DSID, 1996. *Direction de la Statistique, de l'Information et de la Documentation. Rapport annuel.*
- DSP (Direction de Soutien à la Production) , 2009. *Nouvelle Société Cotonnière du Togo (NSCT). Rapport d'activités, ITRA/CRA-SH, Kolokopé.*
- Duchaufour, D., Souchier, B., 1979. *Analyse de complexes organo-minéraux des sols* : Edition Masson, Paris 1979.
- Duchaufour, P., Jacquin, F., 1966. Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. ENSA Nancy VIII*, 3-24.
- Edwards, A.P., Bremmer, J.M., 1964. Use of sonic vibration for separation of soil particles. *Can. J. Soil Sci.* 44, 366.
- Edwards, C.H., Penney, D.E., 2000. *Differential equations and boundary value problems, in: Computing and Modeling*, 2nd ed. Prentice Hall International, London, p. 782.
- Elliott, L.F., Papendick, R.I., 1986. Crop residue management for improved soil productivity. *Biol. Agric. Hort.* 3, 131–142.
- Evans, L.T., Wardlow, I.F., Fischer, R.A., 1975. Wheat, in: Evans, L.T., (Ed.), *Crop Physiology: Some Case Histories*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 101–149.

- Fageria, N.K. and Baligar, V.C., 2004. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. *Communication in Soil Science and Plant Analyses*, 32, 1303-1319.
- Falloon, P., Smith, P., Coleman, K., Marshall, S., 1998. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry* 30, 1207–1211.
- FAO, 2006. Food and Agriculture Organisation of United Nations. Annual report.
- FAO Stat, 2010. Food and Agriculture Organisation of United Nations. Resources STA Fertilisers.
- Fauck, R., Moreaux, C., Thomann, C., 1969. Bilan de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. *Agronomie Tropicale*, 24, 263-301.
- Feller, C., 1995a. *La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments fonctionnels. Une approche granulométrique*. Collection TDM, Vol.144. ORSTOM, Paris, 393 p.
- Feller, C., 1995b. La matière organique du sol : un indicateur de fertilité. Application aux zones sahélienne et soudanienne. *Agriculture et Développement*, 8, 35-41.
- Feller, C., Albrecht, A., Tessier, D., 1996. Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectic tropical soils, in: Carter, M.R., Steward, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Advances in Soil Science, CRC Press, Boca Raton, Floride.
- Feller, C., Beare, M.H., 1997b. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79 (1-4), 69-116.
- Feller, C., Bernhard-Reversat, F., Garcia, J.L., Pantier, J.J., Roussos, S., van Vliet-Lanoe B., 1983. Etude de la matière organique de différentes fractions granulométriques d'un sol sableux tropical. Effet d'un amendement organique (compost). *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 20 (3), 223-238.
- Feller, C., Burtin, G., Gérard, B., Balesdent, J., 1991b. Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêts et limites. *Science du Sol*, 29, 77-94.

- Feller, C., Ganry, F., Cheval, M., 1981. Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agro-système tropical. I. Influence d'une fertilisation azotée (urée) et d'un amendement organique (compost) sur la répartition du carbone et de l'azote dans différents compartiments d'un sol sableux. *Agronomie Tropicale*, 36 (1), 9-17.
- Feller, C., Lavelle, P., Albrecht, A., Nicolardot, B., 1993. La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux. Rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Quelques éléments de réflexion, in : C. Floret and G. Serpantier (Eds.), *La jachère en Afrique de l'Ouest*, Atelier international, Montpellier (FRA), 02-05/12/1991. Paris (FRA), ORSTOM, p. 14-32.
- Feller, C., Milleville, P., 1977a. Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal Oriental). I : Présentation de l'étude et évolution des principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. *Cahiers ORSTOM, Série Biologie* 12 (3), 199-211.
- Feller, C., Milleville, P., 1977b. Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal Oriental). II : Aspects biologiques et caractéristiques de la matière organique. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 15 (3), 291-302.
- Feller, C., Thuries, L.J.M., Manlay, R.J., Robin, P., Frossard, E., 2003. ‘‘ The principles of rational agriculture’’ by Albrecht Daniel Thaer (1752-1828). An approach to the sustainability of cropping systems at the beginning of the 19th century. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 687-698.
- Fermont, A.M., van Asten, P.J.A., Tittonell, P., van Wijk, M.T., Giller, K.E., 2009. Closing the cassava yield gap: an analysis from smallholder farmers in East Africa. *Field Crops Research* 112, 24-36.
- Fesneau, C., 2004. *Observatoire de la fertilité du sol au Nord Cameroun*. Mémoire de DEA. Montpellier, 82p.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M., Zuberer, D.A., 1995. Tillage induced seasonal changes in soil physical properties affecting CO₂ evolution under intensive cropping. *Soil Tillage and Research*, 34, 41–60.
- Gavinelli, E., Feller, C., Larre-Larrouy, M.C., Bacyé, B., Djegui, N., Nzila, J.D.D., 1995a. A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: example for

- tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26 (11-12), 1749-1760.
- Giller, K.E., Cadisch, G., Palm, C.A., 2002. The North-South divide Organic wastes or resources for nutrient management. *Agronomie*, 22, 703–709.
- Girardin, C., Mariotti, A., 1991. Analyse isotopique du ^{13}C en abondance naturelle dans le carbone organique : un système automatique avec robot préparateur. *Cah. Orstom, Sér. Pédol. Vol. XXVI, n°4*, 371-380.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P., 1994a. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid-state ^{13}C MNR spectrometry and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 285-309.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P., 1994b. Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 1043-1068.
- Gottschalk, P., Bellarby, J., Chenu, C., Foereid, B., Smith, P., Wattenbach, M., Zingore, S., Smith, J., 2010. Simulation of soil organic carbon response at forest cultivation sequences using ^{13}C measurements. *Organic Geochemistry*, 41, 41–54.
- Grandeau, L., 1879. *Chimie et Physiologie appliquée à l'agriculture et à la sylviculture. I. Nutrition de la plante (Chemistry and Physiology Applied to Agriculture and Forestry. I. Plant Nutrition)* Berger-Levrault et Cie Ed, Paris.
- Gregory, P.J., Reddy, M.S., 1982. Root-growth in an intercrop of pearl-Millet-groundnut. *Field Crop Res.* 5, 241-252.
- Groot, J.J.R., Hassink, J., Koné, D., 1998a. Dynamique de la matière organique du sol, in: Breman, H., Sissoko, K. (Eds.), *L'intensification agricole au Sahel*. AB-DLO, Wageningen et IER, Bamako. Edition Karthala Arago 75013 Paris.
- Groot, J.J.R., Koné, D., Traoré, M., Soumaré, A., Meijboom, F.W., 1998b. Systèmes racinaires des cultures et des ligneux, in: Breman, H., Sissoko, K. (Eds.), *L'intensification agricole au Sahel*. AB-DLO, Wageningen et IER, Bamako. Edition Karthala Arago 75013 Paris.
- Guibert, H., Fallavier, P., Romero, J.J., 1999. Carbon content in soil particle size and consequence on cation exchange capacity of Alfisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30 (17-18), 2521-2537.

- Gupta, V.V.S.R. and Germida, J.J., 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 20, 777–86.
- Hanotiaux, G., Delecourt, F., Legros, A., Mathieu, L., Geets, M., 1975. *Techniques d'analyses pédologiques*. Gembloux, Belgique, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques (Laboratoire de la science du sol), p. 105.
- Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E., Sevensen, H., 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation DAISY. *Fert. Res.* 27, 245–259.
- Harmand, J.M. and Njiti, C.F., 1998. Effets de jachères agroforestières sur les propriétés d'un sol ferrugineux et sur la production céréalière. *Agriculture et développement Vol. XVIII*, 21-30.
- Hassenfratz, J.U., 1792. Sur la nutrition des végétaux (On plant nutrition). *Ann. Chim.* 13, pp178–192.
- Haynes, R.J. and Williams, P.H., 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Adv Agron* 49, 119–199.
- He, Y., Chen, C., Xu, Z., Williams, D., Xu, J., 2009. Assessing management impacts on soil organic matter quality in subtropical Australian forests using physical and chemical fractionation as well as ^{13}C NMR spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 640-650.
- Helfrich, M., Flessa, H., Mikutta, R., Dreves, A., Ludwig, B., 2007. Comparison of chemical fractionation methods for isolating stable soil organic carbon pools. *European Journal of Soil Science*, 58, 1316–1329.
- Hénin, S., Dupuis, M., 1945. Essai de bilan de la matière organique des sols. *Ann. Agron.* 15, 161–172.
- Hien, E., 2004. *Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrugineux du Centre Ouest Burkina : influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique*. Thèse de Doctorat, ENSA Montpellier, 137 p.
- Hoà, N. M., Janssen, H. B., Oenema, O., Dobermann, A., 2006. Comparison of partial and complete soil K budgets under intensive rice cropping in the Mekong Delta, Vietnam. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 116, 121–131.

- Hoesflood, H., Van der Pool, F., Roeleveld, L., 1993. Jachères améliorées : option pour le développement des systèmes de production en Afrique de l'Ouest. *Bulletin KIT, Développement agricole*, 333, 86p.
- Holland, G.A. and Coleman, D.C., 1987. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem. *Ecology*, 62, 425–433.
- Howard, P.J.A., Loveland, P.J., Bradley, R.I., Dry, F.T., Howard, D.M., Howard, D.C., 1995. The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain. *Soil Use Manage.* 11, 9-15.
- Howeler, R.H., 1991a. Long-term effects of cassava cultivation on soil productivity. *Field Crop Res.* 26, 1-18.
- IFDC (International Fertilizer Development Center), 2005. Annual Report. Muscle Shoals, Alabama, U.S.A.
- IPCC, 2001. Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Janik, L., Spouncer, L., Correll, R., Skjemstad, J., 2002. Sensitivity analysis of the RothC soil carbon model (ver. 26.3 Excel). National Carbon Accounting System Technical Report 30. *Australian Greenhouse Office, CSIRO Land and Water and Mathematical and Information Sciences, Canberra, Australia.*
- Janssen, B.H., 1984. A simple method for calculating decomposition and accumulation of young soil organic matter. *Plant and Soil* 76, 297–304.
- Janssen, B.H., Guiking, F.C.T., Van der Eijk, D., Smaling, E.M.A., Wolf, J., Van Reuler, H., 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46, 299-318.
- Jenkinson, D.S., Hart, P.B.S., Rayner, J.H., Parry, L.C., 1987. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. *Itacol Bulletin*, 15, 1-8.
- Jenkinson, D.S., Rayner, J.H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 123, 298-305.
- Jiyun, J., Lin, B., Zhang, W., 1999. Improving nutrient management for sustainable development of agriculture in China, in: Smaling, E.M.A., Oenema, O., Fresco, L.O.

- (Eds.), *Nutrient Disequilibria in Agroecosystems: Concepts and Case Studies*. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 157–174.
- Kaiser, K., Eusterhues, K., Rumpel, C., Guggenberger, G., Kögel-Knabner, I., 2002. Stabilisation of organic matter by soil minerals — investigations of density and particle-size fractions of two acid forest soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 165, 451–459.
- Kanchikerimath, M., Singh, D., 2001. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize–wheat–cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semiarid region of India. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86, 155–162.
- Kapkiyai, J.J., Karanja, N.K., Qureshi, J.N., Smithson P.C., Woomer P.L., 1999. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 1773–1782.
- Kätterer, T. and Andrén, O., 1999. Long-term agricultural field experiments in Northern Europe: analysis of the influence of management on soil carbon stocks using the ICBM model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 72, 165–179.
- Kintché, K., Guibert, H., Sogbedji, J.M., Levêque, J., Tittonell, P., 2010. Carbon losses and primary productivity decline in savannah soils under cotton-cereal rotations in semiarid Togo. *Plant and Soil* 336, 469–484.
- Kleber, M., Mikutta, R., Torn, S., Jahn, R., 2005. Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons. *European Journal of Soil Science* 56, 717–725.
- Kortleven, J., 1963. Quantitative aspects of humus accumulation and decomposition. Verslagen Landbouwkundige Onderzoekingen 69, Pudoc, Wageningen.
- Kumar K. and Goh K.M., 2002. Management practices of antecedent leguminous and non-leguminous crop residues in relation to winter wheat yields, nitrogen uptake, soil nitrogen mineralization and simple nitrogen balance. *Eur. J. of Agronomy*, 16, 295–308.
- Kumar, V., Ghosh, B.C., Bhat, R., 1999. Recycling of crop wastes and green manure and their impact on yield and nutrient uptake of wetland rice. *J. Agric. Sci.* 132, 149–154.
- Ladd, J.N., Amato, M., Grace, P.R., Van Veen, J.A., 1995. Simulation of ^{14}C turnover through the microbial biomass in soils incubated with ^{14}C labelled plant residues. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 777–783.

- Ladha, J.K., Dawe, D., Pathak, H., Padre, A.T., Yadav, R.L., Bijay Singh, Yadvinder-Singh, Singh, Y., Singh, P., Kundu, A.L., Sakal, R., Regmi, A.P., Gami, S.K., Bhandari, A.L., Amin, R., Yadav, C.R., Bhattarai, E.M., Das, S., Aggarwal, H.P., Gupta, R.K., Hobbs, P.R., 2003. How extensive are yield declines in long-term rice–wheat experiments in Asia? *Field Crops Res.* 81, 159–180.
- Larson, W.E. and Pierce, F.J., 1992. Conservation and enhancement of soil quality, in: Elliot, C.R., Latham, M., Dumanski, J. (Eds.), *Evaluation for sustainable land management in the developing world*, Vol. 2, Technical Papers. Bangkok, Thailand: IBSRAM Proceedings 12
- Lawson, A., 2004. *Rapport du diagnostic sur la filière coton au Togo*. Rapport d'étude, 17 p.
- Leavitt, S.W., Follett, R.F., Paul, E.A., 1997. Estimation of slow and fast-cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis. *Radiocarbon*, 38, 231–239.
- Liang, B.C., Gregorich, E.G., MacKenzie, A.F., 1999. Short-term mineralization of maize residues in soils as determined by carbon-13 natural abundance. *Plant and Soil*, 208, 227–232.
- Lilia, R. R., 2004. *Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferralitiques des hautes terres de Madagascar*. Thèse d'Etat ès Sc. Naturelles, Univ. d'Antananarivo, 199p.
- Linères, M., 1993. Pourquoi caractériser les amendements organiques ? *PHM Revue horticole*, 337, 5-8.
- Louppe, D., Ouattara, N., Olivier, R., 1998. Maintien de la fertilité dans trois jachères arborées. Bilan minéral (Korhogo, nord Côte d'Ivoire). *Agriculture et développement, Spécial sols tropicaux*, 18, pp 47-54.
- Mando, A., Ouattara, B., Sédogo, M., Stroosnijder, L., Ouattara, K., Brussaard, L., Vanlauwe, B., 2005. Long-term effect of tillage and manure application on soil organic fractions and crop performance under Sudano-Sahelian conditions. *Soil Tillage and Research*, 80, 95–101.
- Manlay, R.J., Feller, C., Swift, M.J., 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 119, 217-233.

- Manske, G.G.B., Ortiz-Monasterio, J.I., van Ginkel, M., González, R.M., Fischer, R.A., Rajaram, S., Vlek, P.L.G., 2001. Importance of P uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. *European Journal of Agronomy*, 14, 261–274.
- Mariotti, A., 1991. Le carbone 13 en abondance naturelle, traceur de la dynamique de la matière organique des sols et de l'évolution des paléoenvironnements continentaux. *Cah. Orstom, Sér. Pédol. Vol. XXVI, n°4*, 299-313.
- Maroko, J.B., Buresh, R.J., Smithson, P.C., 1998. Soil nitrogen availability as affected by fallow maize systems on two soils in Kenya. *Biol. Fertil. Soils*, 26, 229-234.
- Martin, A., Mariotti, A., Balesdent, J., Lavelle, P., 1992. Utilisation of the ^{13}C natural abundance as a tracer for the study of the soil organic matter assimilation by a tropical geophagous earthworm. *Ecology*, 73 (1), 118-128.
- Martin, A., Mariotti, A., Balesdent, J., Lavelle, P., Vuattoux, R., 1990. Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by ^{13}C natural abundance measurements. *Soil Biology and Biochemistry*, 22 (4), 517-523.
- Martin, A.E., 1829. *Traité théorique et pratique des amendements et des engrais (Theoretical and Practical Treatise on Enrichments and Fertilizers)*. Rousselon Libr. Ed, Paris.
- Mary, B., Guérif, J., 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agric* 3, 247–257.
- Masse, D., Cadet, P., Chotte, J.L., Diatta, M., Floret, C., N'diaye-Faye, N., Pate, E., Pontanier, R., Thioulouse, J., Villenave, C., 1998. Jachères naturelles et restauration des propriétés des sols en zone semi-aride. Cas du Sénégal. *Agriculture et développement*, 18, pp 31-38.
- Mathieu, O., 2005. *Application du traçage isotopique ^{15}N à l'étude du protoxyde d'azote (N_2O), gaz à effet de serre produit par l'activité microbienne des sols. Quantification des flux et approche spatiale au terrain*. Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne, France.
- McDowell, R., Condron, L., 2001. Influence of soil constituents on soil phosphorus sorption and desorption. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 2531–2547.

- Mikutta, R., Kleber, M., Kaiser, K., Jahn, R., 2005. Review: organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. *Soil Science of America Journal*, 69, 120–135.
- Mikutta, R., Kleber, M., Torn, M.S., Jahn, R., 2006. Stabilization of soil organic matter: association with minerals or chemical recalcitrance? *Biogeochemistry* 77, 25–56.
- Milkha, S.A. and Sukhdev, S.M., 2004. Fertilizer nitrogen use efficiency as influenced by interactions with other nutrients, in: Mosier, A. R., Syers, J.K., Freney (Eds.), *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. Istand Press, Scope 65, pp 181-191.
- Monnier, G., Turc, L., Jeanson-Luusinang, C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. Agro.* 13, 55-63.
- Monnizier, J.L., Ladd, J.N., Fitzpatrick, R.W., Foster, R.C., Raupach M., 1991. Components and microbial biomass content of size fractions in soils of contrasting aggregation. *Geoderma*, 49, 37-62.
- Morel, R., Chabouis, C., Bourgeois, S., 1981. Evolution des taux d'azote et de carbone organiques dans un sol nu après 15 ans d'enfouissement de paille sous différentes conditions. *Agronomie*, 1 (1), 1-17.
- Morel, R., Quantin, P., 1972. Les jachères et la régénération du sol en climat soudano guinéen d'Afrique Centrale. *Agronomie Tropicale*, 27 (6-7), 105-133.
- Mosier, A. R., Syers, J.K., Freney, J.R., 2004. Nitrogen fertilizer: an essential component of increased food, feed and fiber production, in: Mosier, A. R., Syers, J.K., Freney (Eds.), *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. Istand Press, Scope 65, pp 3-15.
- Neufeldt, H., Ayarza, M.A., Resck, D.V.S., Zech W., 1999. Distribution of water-stable aggregates and aggregating in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, 93, 85-99
- Nicolardot, B., Molina, J.A.E., Allard, M.R., 1994. C and N fluxes between pools of soil organic matter: model calibration with long-term incubation data. *Soil Biology and Biochemistry*, 26, 235–243.
- Norman, R.J., Wilson, C.E., Slaton, N.A., 2003. Soil fertilization and mineral nutrition in U.S. mechanized rice culture, in: Smith, C.W., Dilday, R.H. (Eds.), *Rice: Origin, History, Technology, and Production*. JohnWiley & Sons, Hoboken, NJ, pp. 331–412.

- Nye, P.H., Greenland, D.J., 1960. The Soil Under Shifting Cultivation. *Technical Communications, Vol. 51. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal*, 156p.
- Nyle, C.B., Ray, R.W., 2008. *The nature and properties of soils*. Fourteenth edition. Pearson International Edition.
- Öborn, I., 2004. Do we risk nutrient imbalances in organic dairy production? in: Steiness, E. (Ed.), *Geomedical Aspects of Organic Farming*. The Norwegian Academy of Science and Letters, Oslo, pp. 71–83.
- Oenema, O., Heinen, M., 1999. Uncertainties in nutrient budgets due to biases and errors, in: Smaling, E.M.A., Oenema, O., Fresco, L.O. (Eds.), *Nutrient Disequilibria in Agroecosystems-Concepts and Case Studies*. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Oikeh, S.O., Kling, J.G., Okoruwa, A.E., 1998. Nitrogen fertilizer management effects on maize grain quality in the West African moist savanna. *Crop Sci.* 38, 1056–1061.
- Oliver, R., Njiti, C.F., Harmand, J.M., 2000. Analyse de la durabilité de la fertilité acquise suite à des jachères arborées au Nord-Cameroun. *Etude et Gestion des Sols*, 7, 287- 309.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. U.S. Dep. of Agric. Circ. 939.
- Ouattara, B., 1991. *Etudes des effets de divers substrats organiques sur les propriétés physicochimiques d'un sol ferrugineux tropical du Burkina Faso*. Mémoire de DEA d'Ecologie Tropicale option Végétale, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan, 62 p.
- Ouattara, B., 1994. *Contribution à l'étude de l'évolution des propriétés physiques d'un sol ferrugineux tropical sous culture : Pratiques culturelles et états structuraux du sol*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan, 153 p.
- Ouattara, N., Louppe, D., Balle, P. 1997. Rôle des macro-invertébrés dans la restauration de la fertilité en zone de savane Soudano-guinéenne : Cas particulier des vers de terre et des termites, in : Floret, C., Pontanier, R. (Eds.), *La jachère en Afrique tropicale*. Vol XVII, pp 61-68.
- Pandey, R.K., Maranville, J.W., Admou, A., 2001. Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment. I. Grain yield, yield components and water use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 15, 93–105.

- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V., Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1173–1179.
- Pathak, H., Aggarwal, P.K., Roetter, R., Kalra, N., Bandyopadhyaya, S.K., Prasad, S., Van Keulen, H., 2003. Modelling the quantitative evaluation of soil nutrient supply, nutrient use efficiency, and fertilizer requirements of wheat in India. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 65, 105–113.
- Paul, E.A., Collins, H.P., Leavitt, S.W., 2001. Dynamics of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ^{14}C abundance. *Geoderma*, 104, 239–256.
- Paul, E.A., Morris, S.J., Contant, R.T., Plante, A.F., 2006. Does the acid hydrolysis incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Science of America Journal*, 70, 1023–1035.
- Paul, S., Veldkamp, E., Flessa, H., 2008c. Differential response of mineral-associated organic matter in tropical soils formed in volcanic ashes and marine Tertiary sediment to treatment with HCl, NaOCl, and $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 1846–1855.
- Paul, S., Flessa, H., Veldkamp, E., Lopez-Ulloa, M., 2008a. Stabilization of recent soil carbon in the humid tropics following land use changes: evidence from aggregate fractionation and stable isotope analyses. *Biogeochemistry*, 87, 247–263.
- Paustian, K., Collins, H.P., Paul, E.A., 1997. Management controls on soil carbon, in: Paul, E.A., Paustian, K.H., Elliott, E.T., Cole, C.V. (Eds.), *Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems: Long-Term Experiments in North America*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 15–50.
- Penning de Vries, F.W.T., Van Laar, G., 1982. *Simulation of plant growth and crop production, Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, The Netherlands. pp 308.
- Pichot, J., 1975. Rôle de la matière organique dans la fertilité du sol. *Agronomie Tropicale*, 30, 170–175.
- Pichot, J., Sedogo, M.P., Poulain, J.F., Arrivets, J., 1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. *Agronomie Tropicale* 36 (2), 122–133.
- Pieri, C., 1989. *Fertilité des terres des savanes*. Ministère de la Coopération CIRAD, 444 p.

- Pieri, C., 1992. *Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah*. Springer Series in Physical Environment, Springer-Verlag, Berlin, 348 p.
- Plante, A.F., Chenu, C., Balabane, M., Mariotti, A., Righi, D., 2004. Peroxide oxidation of clay-associated organic matter in a cultivation chronosequence. *European Journal of Soil Science*, 55, 471–478.
- Plante, A.F., Contant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K., Six, J., 2006. Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt- and clay sized fraction to isolate resistant soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, 57, 456–467.
- Plenet, D., Lubet, E., Juste, C., 1993. Evolution à long terme du statut carboné du sol en monoculture non irriguée de maïs. *Agronomie*, 13, 685–698.
- Putthacharoen, S., Howeler, R.H., Jantawat, S., Vichukit, V., 1998. Nutrient uptake and soil erosion losses in cassava and six other crops in a Psamment in eastern Thailand. *Field Crop Res.* 57, 113-126.
- Qian, J.A., Doran, J.W., Walters, D.T., 1997. Maize plant contributions to root zone available carbon and microbial transformations of nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry* 29, 1451–1462.
- Raison, R.J., O'Connell, A.M., Khanna, P.K., Keith, H., 1993. Effect of repeated fires on nitrogen and phosphorus budgets and cycling processes in forest ecosystems, in: Trabaud, L., Prodon, R. (Eds.), *Fire in mediterranean ecosystems*. Brussels, pp. 347–63.
- Rao, M.R., Nair, P.K.R., Ong, C.K., 1998. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 38, 3-50
- Roose E., 1981. Dynamique actuelle des sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Paris: *Cah. ORSTOM*, 130, 253p.
- Roose, E. and Barthès, B., 2001. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa: a contribution from Francophone research. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 61, 159–170.
- Roussel, O., Bourmeau, E., Walter, C.H., 2001. Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Etude et Gestion des sols* 8, 65–81.

- Rovira, P., Vallejo, V.R., 2000. Examination of thermal and acid hydrolysis procedures in characterization of soil organic matter. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31, 81–100.
- Rovira, P., Vallejo, V.R., 2007. Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 202-215.
- Rufino, M.C., Tittonell, P., van Wijk, M.T., Castellanos-Navarrete, A., Delve, R.J., de Ridder N., Giller, K.E., 2007. Manure as a key resource within smallholder farming systems: Analysing farm-scale nutrient cycling efficiencies with the NUANCES framework. *Livestock Science*, 112, 273-287.
- Ruiz, L., Ganry, F., Waneukem, V., Oliver, R., Siband, P., 1995. Les indicateurs de la fertilité azotée des terres en région tropicales semi-aride. *Agriculture et Développement*, 5, 38-46.
- Sanchez, P.A., Shepherd, K.D., Soule, M.J., Place, F.M., Mukwunye, A.U., Bursch, R.J., Kwesiga, F.R., Izac, A.-M.N., Ndiritu, C.G., Woomer, P.L., 1997. Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital, in: Bursch, R.J., Sanchez, P.A., Calhoon, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 1-46.
- Saragoni, H., Olivier, R., Poss, R., 1991. Dynamique et lixiviation des éléments minéraux. *Agronomie Tropicale*, 45, 259-273.
- Sauerbeck, D.R., Gonzalez, M.A., 1977. Field decomposition of carbon 14-labeled plant residues in various soils of Federal Republic of Germany and Costa Rica, in: International Atomic Energy Agency, Vienne (Eds.), *Soil organic matter studies 1*, pp 159–170.
- Scherer, H.W., Goldbach, H.E., Clemens, J., 2003. Potassium dynamics in the soil and yield formation in a long-term field experiment. *Plant Soil and Environment*, 49, 12, 531-535.
- Schlesinger, W.H., Palmer Winkler, J., Megonigal, J.P., 2000. Soils and the global carbon cycle, in: Wigley, T.M.L., Schimel, D.S. (Eds.), *The Carbon Cycle*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 93–101.
- Schloesing, T., 1874. Etude sur la terre végétale (Study on vegetable earth). *Ann. Chim. Phys.*, 5ème series 2, 514–546.
- Schnitzer, M., 1986. The synthesis, chemical structure, reactions and functions of humic substances, in: Burns, R.G., dell’Agnola G., Miele, S., Nardi, S., Savoini, G., Schnitzer,

- M., Sequi, P., Vaughan D., Visser, S.A. (Eds.), *Humic substances: effect on soil and plants*. Congress on Humic Substances. March
- Schnitzer, M., Preston, C.M., 1983. Effects of acid hydrolysis on the ^{13}C NMR spectra of humic substances. *Plant and Soil*, 75, 201–211.
- Schroth, G., Kolbe, D., Pity, B., Zech, W., 1995. Searching for criteria for the selection of efficient tree species for fallow improvement, with special reference to carbon and nitrogen. *Fertilizer Research*, 42, 297-314.
- Schwartz, D., 1991. Intérêt de la mesure du ^{13}C des sols en milieu naturel équatorial pour la connaissance des aspects pédologiques et écologiques des relations savane-forêt Exemples du Congo. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVI, 4, 327-341.
- Sedogo, P.M., 1993. *Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: incidence des modes de gestion sur la fertilité*. Thèse de Docteur ès Sciences, Université de Côte d'Ivoire, Abidjan, 330 p.
- Shatar, T.M., McBratney, A.B., 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *J. Agr. Sci.* 142, 553–560.
- Siband, P., 1972. Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute-Casamance. Principaux résultats. *Agronomie Tropicale* 27 (5), 574-591.
- Siband, P., 1974. Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. *Agronomie Tropicale*, 29 (12), 1228-1248.
- Silveira, M.L., Comerford, N.B., Reddy, K.R., Cooper, W.T., El-Rifai, H., 2008. Characterization of soil organic carbon pools by acid hydrolysis. *Geoderma*, 144, 405-414.
- Singh, B., Goulding, K.W.T., 1997. Changes with time in the potassium content and phyllosilicates in the soil of the Broadbalk continuous wheat experiment at Rothamsted. *Eur. J. Soil Sci.* 48, 651–659.
- Siregar, A., Kleber, M., Mikutta, R., Jahn, R., 2005. Sodium hypochlorite oxidation reduces soil organic matter concentrations without affecting inorganic soil constituents. *European Journal of Soil Science*, 56, 481–490.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K., 2002a. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C saturation of soils. *Plant and Soil* 241, 155–176.

- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S.M., Sa J.C.D., Albrecht A., 2002b. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.
- Skjemstad, J. O., Le Feuvre, R. P., Prebble, R. E., 1990. Turnover of soil organic matter under pasture as determined by ^{13}C natural abundance. *Aust. J. Soil Res.* 28, 267–276.
- Skjemstad, J.O., Clarke, P., Golchin, A., Oades, J.M., Cadisch, G., Giller, K.E., 1997. Characterization of soil organic matter by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy, in: Cadisch, G., Giller, K.E. (Eds.), *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. Cab International, Wallingford, UK, pp 253–271
- Smaling, E.M.A., 2007. Fertilizers and the environment: friends or Foes? in: IFDC (Ed.), *Proceedings African fertilizer summit*, Abuja, Nigeria June 9–13, 2006. Muscle Shoals, (Special publication IFDC—SP 39), pp. 54–56.
- Smaling, E.M.A., Janssen, B.H., 1993. Calibration of QUEFTS, a soil model predicting nutrient uptake and yields from chemical soil fertility indices. *Geoderma*, 49, 21-42.
- Smith, P., Smith, J., Powlson, D.S., McGill, W.B., Arah, J.R.M., Chertov, O.G., Coleman, K., Franco, U., Frolking, S., Jenkinson, D.S., Jensen, L.S., Kelly, R.H., Klein-Gunnewiek, H., Komarov, A.S., Li, C., Molina, J.A.E., Mueller, T., Parton, W.J., Thornley, J.H.M., Whitmore, A.P., 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81, 153–225.
- Sogbedji, J.M., van Es, H.M., Melkonian, J.J., Schindelbeck, R.R., 2006. Evaluation of the PNM model for simulating drain flow nitrate-N concentration under manure fertilizer maize. *Plant and Soil*, 282, 343–360.
- Solomon, D., Lhemann, J., Kinyangi, J., Amelung, W., Loge, I., Pell, A., Riha, S., Goze, S., Verchot, L., Mbugua, D., Skjemstad, J., Schäfer, T., 2007. Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical grassland ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* 13, 511–530.
- Solomon, D., Lhemann, J., Zech, W., 2000. Land use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid Northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 78, 203-213.

- Sorensen, P., Ladd, J.N., Amato M., 1996. Microbial assimilation of C-14 of ground and unground plant materials decomposing in loamy sand and a clay soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 1425–1434.
- SOTOCO (Société Togolaise de Coton), 2003. *Rapport annuel*. 72p.
- Staben, M.L., Bezdzizek, D.F., Smith, J.L., Fauci, M.F., 1997. Assessment of soil quality conservation reserve program and wheat- fallow soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 124-130.
- Stevenson, F.J., Cole, M.A., 1999. *Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients*. JohnWiley & Sons Inc., New York.
- Stoorvegel, J.J., Smaling, E.M.A., 1990. Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa: 1983-2000. *Main Rep.*, 28, vol. 1-4. *Winand Staring Ctr., Wageningen, the Netherlands*.
- Stout, J.D., Goh, K.M., Rafter, T.A., 1981. Chemistry and turnover of natural occurring resistant organic compounds in soil, in: Paul, E.A., Ladd, J.N.Z (Eds.), *Soil Biochemistry*, vol. 5, Marcel Dekker, NY, pp. 19–24.
- Sumner, M.E., Farina, M.P.W., 1986. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 5, 201-236.
- Suzor, H., 1991. *Evaluation et diagnostic de la fertilité au Cameroun*. ITRA, Lomé, 43 p.
- Swanston, C.W., Caldwell, B.A., Homann, P.S., Ganio, L., Sollins, P., 2002. Carbon dynamics during long-term incubation of separate and recombined density fractions from seven forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1121-1130.
- Swift, M.J., Woome, P., 1993. Organic matter and the sustainability of agricultural systems: definition and measurement, in: Mulongoy, K., Merckx, R. (Eds.), *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture*. Proceedings of an International Symposium, Leuven, Belgium, 4-6/11/1991. John Wiley & Sons, pp. 3- 18.
- Tekalign, M., Haque, I., Kamara, C.S., 1988. Phosphorus status of Ethiopian highland vertisols, in: Jutzi, S.C., Haque, I., McIntyre, J., Stares, J.E.S. (Eds.), *Management of vertisols in Sub-Saharan Africa*. Proceedings of a conference held at the International Livestock Research Center (ILCA). Addis Ababa, Ethiopie, 31 August-4 September, 1987. ILCA, Addis Ababa.

- Thaër, A., 1811. Principes raisonnés d'agriculture (Principles of rational agriculture)
Translated from German by E.V.B. Crud (1811–1816) J.J. Prechoud Ed, Paris.
- Thomann C., 1964. Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'ouest africain. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.* 2, 43-79.
- Tittonell, P., Corbeels, M., van Wijk, M.T., Giller, K.E., 2010. FIELD —a summary simulation model of the soil-crop system to analyse long-term resource interactions and use efficiencies at farm scale. *Eur. J. Agron.* 32, 10–21
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Corbeels, M., Giller, K.E., 2008. Yield gaps, nutrient use efficiencies and response to fertilizers by maize across heterogeneous smallholder farms of western Kenya. *Plant and Soil*, 313, 19-37.
- Tittonell, P., Zingore, S., van Wijk, M.T., Corbeels, M., Giller, K.E., 2007. Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: exploring management strategies across soil fertility gradients. *Field Crop Res.* 100, 348–368.
- Traoré, M., 1995. *Utilisation des éléments nutritifs par une graminée pérenne : Andropogon gayanus*. Thèse de Doctorat, ISFRA, Mali. Rapport PSS n°19, AB-DLO Wageningen/IER-Bamako, 149p.
- Traoré, P.C.S., Bostick, W.M., Jones, J.W., Koo, J., Goïta, K., Bado, B., 2008. A simple soil organic-matter model for biomass data assimilation in community-level carbon contracts. *Ecol. Appl.* 18, 624–636.
- Trichet, P., Jolivet, Cl., Arrouays, D., Loustau, D., Bert, D., Ranger, J., 1999. Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime. *Etude et Gestion des sols*, 6, 4, 197- 214.
- Troughton, J.H., Wells, P.V., Mooney, H.A., 1974. Photosynthetic mechanisms and paleoecology from carbon isotope ratios in ancient specimens of C₃ and CAM plants. *Science*, 185, 610-612.
- Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Amundson, R., 1996. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperate change. *Science* 272, 393–396.
- Trumbore, S.E., Zheng, S., 1996. Comparison of fraction methods for soil organic matter ¹⁴C analysis. *Radiocarbon* 38, 219–229.

- Tull, J., 1733. *Horse-hoeing husbandry or an essay on the principles of tillage and vegetation*, London.
- Van Bergen, P.F., Bull, I.D., Poulton, P.R., Evershed, R.P., 1997. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted Classical Experiments. I. Total lipid extracts, solvent insoluble residues and humic acids from Broadbalk Wilderness. *Organic Geochemistry*, 26, 117–135.
- Van der Pol F., 1992. Soil mining: an unseen contributor to farm income in southern Mali. *Royal Tropical Institute- Amsterdam. Bulletin* 325.
- Van Keulen, H., 2001. Soil organic matter modeling: problems and prospects, in: Christopher & Martius (Eds.), *Managing organic matter in tropical soils*. pp 33-37
- Van Keulen, H., Van Heemst, H.D.J., 1982. *Crop response to the supply of macronutrients. Agricultural Research Reports*, 916. Centre for Agricultural Publishing and documentation, Wageningen, 46 p.
- Vanlauwe, B, Bationo A, Chianu J, Giller KE, Merckx R, Mkwunye U, Ohiokpehai O, Pypers P, Tabo R, Shepherd KD, Smaling, E.M.A., Woomer, P.L., Sanginga N, 2010. Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture* 39, 17-24.
- Verberne, E.L.J., Hassink, J., Willigen, P., Groot, J.J.R., Van Veen, J.A., 1990. Modeling soil organic matter dynamics in different soils. *Neth. J. Agric. Sci.* 38, 221–238.
- Vitorello, V.A., Cerri, C.C., Andreux, F., Feller, C., Victoria, R.L., 1989. Organic matter and natural carbon-13 distribution in forested and cultivated oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 773-778.
- Vlek, P.L.G., Bao Le, Q., Tamene, L., 2008. *Land decline in Land-Rich Africa - A creeping disaster in the making*. Rome, Italy: CGIAR Science Council Secretariat, 63 p.
- Waksman, S.A., 1938. *Humus. Origin, Chemical Composition and Importance in Nature*, 2nd edition. The Williams and Wilkins Company, Baltimore, London, revised.
- Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29-37.

- Waneukem, V., Ganry F., 1992. Relations entre les formes d'azote organique du sol et l'azote absorbé par la plante dans un sol ferralitique du Sénégal. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.* 17, 97-107.
- Weil, R.R., Benedetto, P.W., Sikora, L.J., Bandell, V.A., 1988. Influence of tillage practices on phosphorus distribution and forms in tree Ultisols. *Agronomy Journal*, 80, 503-509.
- Whalen, S.C., Reeburgh, W.S., 2000. Effect of nitrogen fertilization on atmospheric methane oxidation in boreal forest soils Chemosphere. *Global Change Science* 2,151-155.
- Wilding, L.P. and Drees, L.R., 1983. Spatial variability and pedology, in: Wilding, L.P., Smeck, N.E., Hall, G.F. (Eds.), *Pedogenesis and soil taxonomy. I. concepts and interactions*. Elsevier New-York. pp 83-116.
- Wiseman, C.L.S. and Püttmann, W., 2005. Soil organic carbon and its sorptive preservation in central Germany. *European Journal of Soil Science*, 56, 65–76.
- Witt, C., Dobermann, A., Abdulrachman, S., Gines, H.C., Wang, G.H., Nagarajan, R., Satawathananont, S., Son, T.T., Tan, P.S., Tiem, L.V., Simbahan, G.C., Olk, D.C., 1999. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Res.* 63, 113-138.
- Witter, E., Johansson, G., 2001. Potassium uptake from the subsoil by green manure crops. *Biol. Agric. Hort.* 19, 127–141.
- Xiaokun, Li., Jianwei, Lu., Lishu, Wu., Fang Chen, 2009. The difference of potassium dynamics between yellowish red soil and yellow cinnamon soil under rapeseed (*Brassica napus* L.)–rice (*Oryza sativa* L.) rotation. *Plant and Soil*, 320,141–151
- Xu, J.M., Cheng, H.H., Koskinen, W.C., Molin, J.A.E., 1997. Characterization of potentially bioreactive soil organic carbon and nitrogen by acid hydrolysis. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 49, 267–271.
- Yang, H.S., Janssen, B.H., 2000. A mono-component model carbon mineralization with dynamic rate constant. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 517–529.
- Zech, W, Senesi, N, Guggenberger, 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, 79, 117–161.
- Zeng, Q., Brown, P.H., 2000. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. *Plant and Soil*, 221, 121-134.

- Zhang, W.L., Tian, Z.X., Zhang, N., Li, X.Q., 1996. Nitrate pollution of groundwater in northern China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 59, 223-234.
- Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M.W.I., Smith, P., Fuhrer, T., 2007. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 658–667
- Zingore, S., Manyame, C., Nyamugafata, P., Giller, K.E., 2005. Long-term changes in organic matter of woodland soil cleared for arable cropping in Zimbabwe. *Eur. J. Soil Sci.* 57, 727–736

Annexes

Annexe 1 : Données relatives à l'essai dose de fertilisation minérale et restitution au sol de la paille de maïs conduit en terre de barre à Kouvé

Annexe 1.1: Rendements de cultures

Année	Coton-graine (t ha ⁻¹)			Maïs (t ha ⁻¹)		
	No-F	RR	1.5RR	No-F	RR	1.5RR
1972	1,60	1,67	1,70	3,20	3,01	2,98
1973	1,60	1,42	1,36	0,58	0,58	0,56
1974	0,62	0,64	0,75	3,00	3,56	3,53
1975	2,17	2,21	2,38	2,40	2,57	2,68
1976	0,71	1,17	1,09	0,42	0,63	0,66
1977	N-S	N-S	N-S	1,00	1,55	1,58
1978	0,71	1,30	1,50	1,80	2,02	2,01
1979	0,98	1,54	1,65	1,95	2,50	2,34
1980	0,85	2,13	2,34	1,89	2,20	2,20
1981	0,74	2,96	2,76	1,35	1,77	1,55
1982	0,50	1,67	1,97	1,79	2,60	2,68
1983	0,50	1,67	1,80	1,79	2,90	2,68
1984	1,02	2,57	2,93	1,37	2,23	2,47
1985	0,57	2,13	2,28	1,58	2,92	2,98
1986	0,63	1,84	2,09	1,37	3,35	3,51
1987	0,31	1,46	1,52	0,60	1,83	1,83
1988	0,14	1,09	1,14	0,91	2,47	2,57
1989	0,16	0,94	0,95	0,64	2,35	2,85
1990	0,56	2,71	2,80	0,43	1,92	2,14
1991	0,71	3,16	3,22	0,28	1,00	1,05

No-F = Non fertilisées, RR = Fertilisées avec NPK à la dose recommandée par la recherche, 1.5 RR = La dose recommandée de NPK a été augmentée de moitié. N-S = Non semé pour cause de sécheresse.

Annexe 1.2 : Données de sol de la profondeur 0-20 cm

Annexe 1.2.1 : Carbone et azote totaux

Année	Mois	Age	C total (g kg ⁻¹)				N total (g kg ⁻¹)			
			T-NC	No-F	RR	1.5RR	T-NC	No-F	RR	1.5RR
1973	Avril ^a	0,00	14,3	14,3	14,3	14,3	1,28	1,28	1,28	1,28
1973	Juillet ^b	0,25	12,6	12,9	12,6	12,6	1,10	1,39	1,16	1,30
1973	Nov. ^c	0,58	19,8	10,5	11,2	22,5	1,80	0,93	0,93	2,05
1974	Avril	1,00	13,3	13,8	12,6	12,0	1,22	1,18	1,18	1,10
1974	Juillet	1,25	18,8	20,1	21,6	21,0	1,62	1,80	1,78	1,83
1974	Nov.	1,58	18,4	19,3	18,0	18,3	1,47	1,64	1,64	1,73
1975	Avril	2,00	20,5	21,8	19,0	21,0	1,47	1,65	1,07	1,52
1975	Juillet	2,25	22,5	23,9	24,4	27,0	1,70	2,25	2,60	2,50
1975	Nov.	2,58	19,3	19,8	19,8	19,4	2,10	2,00	2,40	2,20

1976	Avril	3,00	23,7	18,9	17,4	22,3	2,54	1,95	1,75	2,10
1976	Juillet	3,25	19,1	16,7	17,4	18,1	1,74	1,35	1,42	1,74
1976	Nov.	3,58	14,4	15,5	16,3	16,4	1,39	1,21	1,62	1,62
1977	Avril	4,00	6,7	6,8	8,3	9,3	0,70	0,75	0,70	0,72
1977	Juillet	4,25	9,0	9,5	9,9	10,4	0,80	0,80	1,00	0,98
1977	Nov.	4,58	7,8	8,2	7,7	9,8	0,70	0,81	0,70	0,99
1978	Avril	5,00	8,0	8,6	7,5	9,0	0,90	0,86	0,80	1,02
1978	Juillet	5,25	8,0	10,0	9,9	10,5	0,90	1,24	1,30	1,40
1978	Nov.	5,58	6,5	6,8	7,8	7,8	0,80	1,03	1,00	0,65
1979	Avril	6,00	6,4	6,9	8,0	7,6	0,90	0,83	1,10	1,06
1979	Juillet	6,25	7,6	8,5	8,5	8,7	0,90	1,00	1,00	1,05
1979	Nov.	6,58	7,0	7,5	8,7	8,3	1,00	0,96	0,90	1,22
1980	Avril	7,00	6,4	8,3	8,0	7,9	0,80	0,72	0,90	0,97
1980	Juillet	7,25	6,9	5,0	9,0	9,0	0,80	0,87	1,00	1,02
1980	Nov.	7,58	6,4	6,1	6,1	6,4	0,70	0,74	0,80	0,74
1982	Avril	8,00	7,3	7,4	7,7	8,3	0,80	0,89	0,90	0,97
1982	Juillet	8,25	6,6	7,6	8,8	8,9	0,70	0,86	0,90	0,98
1982	Nov.	8,58	5,5	5,6	7,0	6,4	0,70	0,60	0,80	0,75
1983	Avril	9,00	5,7	7,3	7,8	7,9	0,60	0,71	0,80	0,77
1983	Juillet	9,25	7,8	7,4	6,8	7,6	0,70	0,72	0,70	0,75
1983	Nov.	9,58	6,5	7,2	7,5	9,8	0,60	0,69	0,70	1,00
1984	Avril	10,00	8,7	10,9	8,9	8,7	0,90	1,01	0,90	0,80
1984	Juillet	10,25	6,9	6,3	7,2	6,3	0,70	0,57	0,70	0,58
1984	Nov.	10,58	6,5	10,2	8,0	10,9	0,60	0,94	0,70	1,05
1985	Avril	11,00	7,7	9,3	9,6	9,3	0,70	0,90	0,90	0,90
1985	Juillet	11,25	8,0	9,2	9,7	9,8	0,80	0,88	0,90	0,98
1985	Nov.	11,58	7,6	11,2	11,0	9,5	0,70	1,06	1,00	0,93
1986	Avril	12,00	8,0	9,8	7,4	8,5	0,60	0,74	0,60	0,69
1986	Juillet	12,25	7,5	8,9	8,7	9,9	0,60	0,66	0,70	0,84
1986	Nov.	12,58	6,9	7,9	7,2	8,2	0,70	0,75	0,70	0,80
1987	Avril	13,00	5,7	6,7	7,5	6,7	0,50	0,66	0,70	0,63
1987	Juillet	13,25	6,8	7,9	7,3	7,5	0,60	0,72	0,70	0,70
1987	Nov.	13,58	6,3	8,8	8,4	8,1	0,70	0,94	1,00	0,98
1988	Avril	14,00	5,9	7,6	7,7	7,4	0,60	0,59	0,80	0,60
1988	Juillet	14,25	5,0	6,6	5,9	8,0	0,40	0,55	0,50	0,56
1988	Nov.	14,58	4,4	6,8	8,0	7,1	0,40	0,55	0,60	0,62
1989	Avril	15,00	5,0	6,6	6,7	7,4	0,70	0,97	1,00	0,90
1989	Juillet	15,25	5,0	6,5	6,5	7,4	0,80	0,82	0,90	0,87
1989	Nov.	15,58	4,3	6,6	7,0	7,3	0,60	0,83	0,90	0,97
1990	Avril	16,00	5,2	6,2	6,0	7,0	0,50	0,55	0,60	0,60
1990	Juillet	16,25	5,5	6,9	7,0	7,1	0,50	0,61	0,60	0,60
1990	Nov.	16,58	4,5	6,5	6,6	7,3	0,50	0,57	0,60	0,61
1991	Avril	17,00	4,6	4,9	5,5	5,5	0,60	0,66	0,70	0,70
1991	Juillet	17,25	4,6	6,0	5,3	5,9	0,60	0,78	0,70	0,72
1991	Nov.	17,58	4,1	5,0	6,0	6,0	0,50	0,61	0,70	0,68

^a semis maïs, ^b semis coton, ^c début de la saison sèche. T-NC = Parcelles labourées non ensemencées ni fertilisées.

Annexe 1.2.2 : Phosphore assimilable et potassium échangeable

Année	Mois	Age	P Olsen (mg kg ⁻¹)				K échangeable (Cml ₊ kg ⁻¹)			
			T-NC	No-F	RR	1.5RR	T-NC	No-F	RR	1.5RR
1973	Avril	0,00					0,26	0,26	0,26	0,26
1973	Juillet	0,25					0,23	0,22	0,20	0,21
1973	Nov.	0,58					0,12	0,11	0,10	0,11
1974	Avril	1,00	39,3	41,0	43,0	42,0	0,26	0,26	0,26	0,25
1974	Juillet	1,25	49,1	50,0	45,0	50,0	0,17	0,13	0,13	0,13
1974	Nov.	1,58	48,8	45,0	35,0	50,0	0,06	0,11	0,11	0,15
1975	Avril	2,00	74,4	95,0	65,0	90,0	0,25	0,18	0,22	0,26
1975	Juillet	2,25	85,0	85,0	78,0	80,0	0,17	0,15	0,14	0,14
1975	Nov.	2,58	88,0	45,0	40,0	45,0	0,14	0,12	0,15	0,18
1976	Avril	3,00					0,09	0,11	0,18	0,19
1976	Juillet	3,25	50,0	45,0	45,0	40,0	0,22	0,20	0,26	0,27
1976	Nov.	3,58	82,0	82,0	29,0	33,0	0,17	0,16	0,18	0,19
1977	Avril	4,00	18,0	20,0	18,0	27,0	0,09	0,12	0,17	0,25
1977	Juillet	4,25	42,0	33,0	38,0	29,0	0,10	0,13	0,23	0,25
1977	Nov.	4,58	39,0	15,0	24,0	25,0	0,10	0,11	0,23	0,22
1978	Avril	5,00	43,0	34,0	35,0	40,0	0,08	0,13	0,22	0,29
1978	Juillet	5,25	48,0	41,0	48,0	53,0	0,15	0,13	0,23	0,26
1978	Nov.	5,58	36,0	32,0	32,0	39,0	0,08	0,08	0,17	0,21
1979	Avril	6,00	16,0	12,0	21,0	19,0	0,06	0,09	0,17	0,23
1979	Juillet	6,25	30,0	19,0	24,0	31,0	0,14	0,11	0,19	0,24
1979	Nov.	6,58	28,0	12,0	17,0	26,0	0,08	0,08	0,23	0,21
1980	Avril	7,00	36,0	26,0	29,0	37,0	0,09	0,09	0,17	0,24
1980	Juillet	7,25	38,0	26,0	27,0	35,0	0,10	0,10	0,20	0,21
1980	Nov.	7,58	26,0	16,0	14,0	15,0	0,06	0,07	0,14	0,17
1982	Avril	8,00	40,0	19,0	20,0	35,0	0,06	0,06	0,17	0,26
1982	Juillet	8,25	22,0	16,0	17,0	37,0	0,04	0,05	0,20	0,25
1982	Nov.	8,58	27,0	17,0	20,0	22,0	0,07	0,07	0,16	0,16
1983	Avril	9,00	23,0	12,0	17,0	20,0	0,04	0,04	0,13	0,26
1983	Juillet	9,25	24,0	14,0	17,0	20,0	0,06	0,07	0,20	0,24
1983	Nov.	9,58	23,0	11,0	14,0	17,0	0,03	0,04	0,17	0,24
1984	Avril	10,00	16,0	14,0	14,0	20,0	0,03	0,04	0,20	0,26
1984	Juillet	10,25	9,0	9,0	9,0	11,0	0,03	0,07	0,22	0,26
1984	Nov.	10,58	22,0	12,0	17,0	22,0	0,02	0,05	0,26	0,34
1985	Avril	11,00	11,0	10,0	25,0	25,0	0,02	0,02	0,21	0,35
1985	Juillet	11,25	35,0	19,0	29,0	38,0	0,04	0,06	0,20	0,29
1985	Nov.	11,58	22,0	12,0	25,0	30,0	0,02	0,09	0,19	0,29
1986	Avril	12,00	29,0	12,0	29,0	29,0	0,03	0,07	0,18	0,28
1986	Juillet	12,25	22,0	10,0	17,0	24,0	0,04	0,06	0,21	0,26
1986	Nov.	12,58	23,0	11,0	28,0	29,0	0,01	0,06	0,24	0,34
1987	Avril	13,00	29,0	14,0	20,0	30,0	0,02	0,06	0,23	0,33
1987	Juillet	13,25	32,0	15,0	40,0	46,0	0,04	0,09	0,30	0,36
1987	Nov.	13,58	17,0	13,0	15,0	31,0	0,01	0,06	0,20	0,30

1988	Avril	14,00	40,6	24,9	37,1	41,7	0,08	0,08	0,28	0,33
1988	Juillet	14,25	49,8	27,0	42,3	52,2	0,04	0,07	0,21	0,23
1988	Nov.	14,58	30,8	19,8	39,0	42,2	0,02	0,05	0,23	0,31
1989	Avril	15,00	43,7	14,6	45,8	44,4	0,04	0,08	0,25	0,27
1989	Juillet	15,25	24,0	31,9	13,4	44,5	0,04	0,07	0,20	0,27
1989	Nov.	15,58	21,3	16,5	30,1	54,6	0,03	0,05	0,21	0,31
1990	Avril	16,00	23,4	14,3	19,3	38,4	0,05	0,06	0,17	0,20
1990	Juillet	16,25	30,7	18,7	46,3	54,6	0,06	0,08	0,22	0,24
1990	Nov.	16,58	19,5	11,2	23,5	37,3	0,05	0,06	0,12	0,23
1991	Avril	17,00	18,1	6,2	11,9	14,7	0,03	0,04	0,15	0,18
1991	Juillet	17,25	22,9	15,3	26,4	34,8	0,07	0,09	0,16	0,22
1991	Nov.	17,58	19,8	9,6	24,4	24,3	0,02	0,05	0,21	0,21

Annexe 1.2.3 : Calcium et magnésium échangeables

Année	Mois	Age	Ca échangeable (Cml+ kg ⁻¹)				Mg échangeable (Cml+ kg ⁻¹)			
			T-NC	No-F	RR	1.5RR	T-NC	No-F	RR	1.5RR
1974	Avril	1,00	4,92	4,75	4,63	4,25	1,71	1,56	1,49	1,37
1974	Juillet	1,25	3,13	3,10	3,35	3,30	1,07	1,15	1,05	1,00
1974	Nov.	1,58	2,78	3,35	2,75	3,00	0,84	1,00	0,75	0,76
1975	Avril	2,00	3,74	4,70	4,70	4,72	1,25	1,46	1,70	1,62
1975	Juillet	2,25	3,34	3,74	3,50	3,61	1,07	1,20	1,16	1,05
1975	Nov.	2,58	3,28	3,19	3,32	3,40	0,90	1,05	1,01	1,06
1976	Avril	3,00	2,49	3,10	3,03	2,88	0,61	0,96	0,99	0,93
1976	Juillet	3,25	4,95	3,60	3,55	3,50	1,32	1,18	1,30	1,20
1976	Nov.	3,58	2,25	2,60	2,50	2,60	0,75	0,91	0,82	0,86
1977	Avril	4,00	2,61	2,81	2,68	2,96	0,91	1,11	1,03	1,07
1977	Juillet	4,25	2,63	2,77	2,68	2,80	1,06	1,04	0,94	0,89
1977	Nov.	4,58	2,05	2,67	2,23	2,87	0,65	0,94	0,81	0,89
1978	Avril	5,00	2,57	2,90	2,56	2,68	0,81	1,06	0,88	0,86
1978	Juillet	5,25	2,58	3,05	2,79	2,71	0,79	1,14	0,93	0,80
1978	Nov.	5,58	2,35	2,74	2,57	2,40	0,75	0,92	0,92	0,72
1979	Avril	6,00	2,29	2,76	2,42	2,04	0,74	0,94	0,89	0,67
1979	Juillet	6,25	2,25	2,73	2,42	2,49	0,76	1,15	0,90	0,89
1979	Nov.	6,58	1,85	2,49	2,47	2,14	0,58	0,93	0,89	0,76
1980	Avril	7,00	2,10	2,23	2,18	2,50	0,55	0,81	0,74	0,71
1980	Juillet	7,25	2,84	2,66	2,30	2,30	0,61	0,99	0,75	0,72
1980	Nov.	7,58	2,25	2,30	2,30	2,25	0,64	0,85	0,87	0,76
1982	Avril	8,00	1,87	2,29	2,09	1,99	0,45	0,80	0,65	0,56
1982	Juillet	8,25	1,99	2,33	1,88	1,93	0,53	0,83	0,62	0,55
1982	Nov.	8,58	2,02	2,00	1,90	1,93	0,60	0,73	0,70	0,63
1983	Avril	9,00	1,84	2,45	1,68	1,76	0,42	0,78	0,51	0,48
1983	Juillet	9,25	1,89	2,43	2,23	2,09	0,44	0,75	0,64	0,55
1983	Nov.	9,58	2,15	2,35	2,03	1,79	0,44	0,73	0,57	0,50
1984	Avril	10,00	2,37	2,41	2,15	2,02	0,53	0,77	0,62	0,57

1984	Juillet	10,25	1,60	2,21	2,07	2,04	0,37	0,78	0,57	0,48
1984	Nov.	10,58	1,39	2,43	1,83	1,95	0,31	0,83	0,52	0,47
1985	Avril	11,00	1,96	2,33	1,94	2,07	0,46	0,84	0,59	0,50
1985	Juillet	11,25	1,54	2,03	1,93	1,81	0,41	0,74	0,54	0,50
1985	Nov.	11,58	1,72	2,27	2,10	2,16	0,41	0,87	0,66	0,55
1986	Avril	12,00	1,55	2,19	2,25	1,68	0,41	0,82	0,77	0,44
1986	Juillet	12,25	1,69	2,25	2,06	1,85	0,44	0,79	0,60	0,50
1986	Nov.	12,58	1,84	2,13	1,88	1,81	0,38	0,73	0,53	0,45
1987	Avril	13,00	1,62	2,38	1,90	1,85	0,36	0,81	0,48	0,41
1987	Juillet	13,25	1,47	2,04	1,75	1,65	0,38	0,79	0,45	0,40
1987	Nov.	13,58	1,83	1,70	1,87	1,62	0,45	0,73	0,60	0,48
1988	Avril	14,00	1,40	1,80	1,93	1,87	0,35	0,75	0,54	0,47
1988	Juillet	14,25	1,07	1,96	1,74	1,61	0,34	0,79	0,51	0,43
1988	Nov.	14,58	1,51	1,88	1,81	1,72	0,39	0,72	0,56	0,50
1989	Avril	15,00	1,27	1,74	1,30	1,42	0,37	0,76	0,43	0,42
1989	Juillet	15,25	1,91	1,52	1,98	1,43	0,48	0,48	0,84	0,43
1989	Nov.	15,58	1,75	1,86	1,43	1,40	0,44	0,83	0,45	0,43
1990	Avril	16,00	1,57	1,82	1,63	1,23	0,39	0,70	0,44	0,33
1990	Juillet	16,25	1,45	1,71	1,14	1,15	0,39	0,66	0,36	0,32
1990	Nov.	16,58	1,55	1,80	2,25	1,22	0,39	0,69	0,65	0,31
1991	Avril	17,00	1,83	1,90	1,54	1,31	0,50	0,86	0,55	0,44
1991	Juillet	17,25	1,75	2,11	1,20	1,29	0,54	0,94	0,46	0,46
1991	Nov.	17,58	1,27	1,78	1,12	1,04	0,41	0,91	0,40	0,36

Annexe 1.2.4 : Capacité d'échange cationique et pH du sol

Année	Mois	Age	CEC (Cml ⁺ kg ⁻¹)				pH (1/2,5)			
			T-NC	No-F	RR	1.5RR	T-NC	No-F	RR	1.5RR
1973	Juillet	0,25					5,95	5,95	5,85	6,65
1973	Nov.	0,58					6,30	6,05	6,00	5,95
1974	Avril	1,00	5,34	4,96	5,53	5,18	6,18	6,30	6,10	6,20
1974	Juillet	1,25	4,49	4,90	5,90	6,30	5,99	5,90	5,90	5,80
1974	Nov.	1,58	4,61	5,60	5,40	6,70	5,92	5,65	5,45	5,60
1975	Avril	2,00	5,00	5,55	6,50	6,30	6,25	6,20	6,40	6,20
1975	Juillet	2,25	5,00	5,50	4,70	5,60	5,50	5,45	5,40	5,30
1975	Nov.	2,58	4,60	4,60	4,85	5,20	5,50	5,55	5,60	5,50
1976	Avril	3,00	3,63	5,15	4,80	4,40	5,40	5,85	5,50	5,25
1976	Juillet	3,25	7,20	6,20	6,00	6,20	6,65	6,05	5,75	5,70
1976	Nov.	3,58	2,55	2,70	2,60	2,40	5,65	5,35	5,45	5,35
1977	Avril	4,00	4,71	4,43	4,52	4,59	5,25	5,45	5,40	5,35
1977	Juillet	4,25	4,64	4,64	4,22	4,80	5,05	5,10	5,00	5,00
1977	Nov.	4,58	3,94	4,22	4,00	4,47	4,90	5,50	5,20	5,15
1978	Avril	5,00	4,60	5,20	4,80	5,13	5,50	5,85	5,65	5,60
1978	Juillet	5,25	5,29	5,67	5,43	5,06	5,75	5,90	5,70	5,65
1978	Nov.	5,58	4,26	4,25	4,35	4,07	5,20	5,75	5,75	5,70

1979	Avril	6,00	5,80	6,00	6,20	5,00	5,55	5,95	5,60	5,30
1979	Juillet	6,25	5,20	5,75	5,60	5,60	5,50	5,55	5,50	5,55
1979	Nov.	6,58	5,20	5,60	6,55	5,50	5,35	5,80	5,65	5,45
1980	Avril	7,00	4,20	4,55	4,70	5,25	5,30	5,50	5,55	5,55
1980	Juillet	7,25	4,80	5,05	4,95	5,60	5,30	5,55	5,50	6,50
1980	Nov.	7,58	4,80	5,10	5,10	5,10	6,80	6,75	6,85	6,55
1982	Avril	8,00	4,35	5,15	4,76	5,06	5,20	5,65	5,50	5,45
1982	Juillet	8,25	4,54	4,79	4,67	4,96	5,25	6,00	5,50	5,35
1982	Nov.	8,58	4,17	3,99	4,20	4,61	5,70	5,95	5,50	5,45
1983	Avril	9,00	4,60	4,86	5,06	4,87	4,90	5,65	5,50	5,40
1983	Juillet	9,25	4,39	4,90	4,96	4,88	5,15	5,50	5,20	5,45
1983	Nov.	9,58	4,79	4,58	4,66	4,75	5,10	5,25	4,95	4,95
1984	Avril	10,00	4,30	4,96	4,64	4,45	5,30	5,60	5,40	5,25
1984	Juillet	10,25	4,02	4,71	4,19	4,54	4,55	5,25	5,30	5,20
1984	Nov.	10,58	3,30	5,07	3,97	4,18	5,10	5,45	5,20	5,45
1985	Avril	11,00	2,69	3,27	2,95	3,06	5,25	5,80	5,50	5,75
1985	Juillet	11,25	2,25	2,94	2,87	2,80	5,15	5,60	5,50	5,40
1985	Nov.	11,58	2,44	3,32	2,98	2,96	5,30	5,75	5,45	5,40
1986	Avril	12,00	2,30	3,31	3,51	2,62	5,30	5,60	5,90	5,60
1986	Juillet	12,25	2,43	3,09	3,10	2,75	5,40	5,80	5,70	5,50
1986	Nov.	12,58	2,53	3,01	2,84	3,02	5,30	5,70	5,55	5,35
1987	Avril	13,00	2,16	3,03	2,28	2,48	5,40	5,80	5,20	5,70
1987	Juillet	13,25	1,86	2,85	2,42	2,53	5,35	5,90	5,65	5,75
1987	Nov.	13,58	2,42	2,62	2,81	2,88	4,95	5,55	5,25	5,10
1988	Avril	14,00	2,15	2,94	3,11	2,96	5,15	5,55	5,55	5,50
1988	Juillet	14,25	1,69	2,82	2,65	2,46	5,55	5,60	5,70	5,40
1988	Nov.	14,58	1,96	2,84	2,56	2,57	5,25	5,55	5,50	5,30
1989	Avril	15,00	2,07	2,84	2,33	2,41	4,85	5,35	5,20	5,10
1989	Juillet	15,25	2,72	2,53	3,01	2,55	5,05	5,60	5,40	5,40
1989	Nov.	15,58	2,25	2,76	2,43	2,51	5,05	5,25	5,20	5,15
1990	Avril	16,00	2,19	2,64	2,41	2,22	4,85	5,10	4,90	4,80
1990	Juillet	16,25	2,14	2,57	2,09	2,07	4,70	4,90	4,85	4,85
1990	Nov.	16,58	2,22	2,71	3,25	2,06	4,90	5,25	4,90	4,90
1991	Avril	17,00	2,85	3,15	2,84	2,59	4,95	5,20	5,00	4,95
1991	Juillet	17,25	2,98	3,45	2,42	2,60	5,10	5,65	5,15	5,20
1991	Nov.	17,58	2,36	3,01	2,21	2,32	4,95	5,45	5,10	4,80

Annexe 2 : Données relative à l'essai jachère de courte durée conduit en sol hydromorphe à Toaga

Annexe 2.1 : Rendements de cultures

Annexe 2.1.1 : Rendements de Coton et de sorgho

Année	Coton (t ha ⁻¹)						Sorgho (t ha ⁻¹)					
	CC		2AJ		3AJ		CC		2AJ		3AJ	
	No-F	RR	No-F	RR	No-F	RR	No-F	RR	No-F	RR	No-F	RR
1968					0,82	1,08						
1969	0,89	1,60	1,77	1,52	1,64	0,97	1,32	1,81			1,30	1,44
1970	0,69	1,93	0,63	1,70	0,33	0,63	1,18	0,90	1,55	1,98	1,33	0,93
1971	0,68	2,11	1,14	2,43	0,93	1,85	0,95	0,97	0,60	0,95	0,82	1,17
1972	0,75	1,94	1,50	2,35			0,83	0,49	0,95	0,74	1,12	1,15
1973	1,26	2,34					0,60	1,09	0,99	1,33		
1974	0,41	0,82	0,78	1,39	0,53	1,41	0,80	1,01				
1975	0,78	1,83	1,04	1,56	1,02	1,39	0,65	0,46	0,52	0,54	0,39	0,55
1976	1,73	2,30	1,37	1,94	1,52	2,24	0,77	0,83	0,72	0,84	0,80	0,86
1977	0,83	2,02	0,65	2,03	0,76	1,80	0,92	1,32	1,16	1,69	0,84	1,65
1978	0,48	1,59					0,49	0,81	0,80	1,49	0,90	1,21
1979	0,48	0,93	0,79	1,23			0,38	0,66				
1980	0,65	2,22	0,60	2,31	0,94	2,43	1,04	1,64	0,75	1,57		
1981	0,65	2,44	0,73	2,63	1,24	2,71	0,37	1,22	0,14	0,51	0,42	1,00
1982	1,39	3,71	0,86	3,23	1,44	2,80	0,26	0,69	1,38	2,63	0,45	1,01
1983	0,66	2,24			1,68	3,14	0,49	1,48	0,61	1,65	0,85	2,13
1984	0,49	2,63	0,86	2,23			0,35	0,68			0,68	1,28
1985	0,80	2,41	0,39	2,48			0,28	1,74	1,58	3,23		
1986	0,47	1,57	1,08	2,16	0,67	1,97	0,79	1,46	0,56	2,04		
1987	0,19	1,87	1,07	2,65	0,93	2,64	0,10	1,15	0,60	1,30	0,25	1,50
1988	0,16	1,04			0,16	0,80	0,07	0,79	0,46	1,64	0,49	1,72
1989	0,19	1,40	0,98	2,40	1,31	3,01	0,90	1,84			0,65	1,63
1990	0,43	2,33	0,62	3,67			0,52	1,74	1,19	2,72	0,87	1,89
1991	1,00	1,88	0,98	2,48			0,40	1,27	0,21	1,05		
1992	0,37	2,34	1,17	3,25	0,49	3,44	0,43	0,76	0,42	1,08		
1993	0,14	0,99			0,74	2,03	0,14	0,81	0,42	1,09	0,26	1,44
1994	0,83	1,52	0,98	1,57	0,41	1,52	0,39	0,82			0,38	1,40
1995	0,13	1,32	0,38	2,14	0,96	2,35	0,50	0,83	0,29	0,67	0,64	0,64
1996	0,06	0,94	0,58	1,78			0,03	0,15	0,04	0,26	0,14	0,13
1997	0,66	1,16	0,73	1,63			0,00	0,00	0,00	0,00		
1998	0,17	0,99			0,30	2,53	0,07	0,23	0,10	0,56		
1999	0,09	0,21	0,73	0,65	0,16	1,05	0,04	0,09			0,02	0,96
2000	0,37	1,67	0,27	1,44	0,67	2,23	0,01	0,26	0,19	0,53	0,26	1,09
2001	0,01	0,40	0,27	1,15	0,40	0,70	0,19	0,30	0,04	0,28	0,13	0,58
2002	0,07	1,38	1,08	2,13			0,04	0,73	0,44	1,94	0,34	1,92

CC = Culture continue, 2AJ = Alternance de 2 années consécutives de jachère à la rotation triennale Arachide/Coton/Sorgho, 3AJ = Alternance de 3 années consécutives de jachère à la rotation.

Annexe 2.1.2 : Rendements d'arachide (t ha⁻¹)

Année	CC		2AJ		3AJ		Année	CC		2AJ		3AJ	
	No-F	RR	No-F	RR	No-F	RR		No-F	RR	No-F	RR	No-F	RR
1967					1,51	1,08	1985	0,82	1,71	0,82	1,15	0,79	2,31
1968			1,33	0,57	1,23	1,78	1986	0,80	2,02	0,95	1,23	0,53	1,04
1969	0,98	1,25	0,86	0,90	0,73	1,08	1987	1,31	2,09			1,03	2,13
1970	0,83	1,09	0,60	0,58	0,83	1,03	1988	0,26	0,76	0,15	1,30	0,71	1,47
1971	1,24	2,00	1,51	1,11			1989	1,00	2,56	1,01	2,38		
1972	0,96	1,08					1990	1,02	1,78	1,23	1,64		
1973	0,55	1,76	0,49	1,41	0,28	0,99	1991	0,87	1,99	1,30	2,17	1,04	3,11
1974	0,43	1,26	0,53	0,64	0,50	1,01	1992	1,23	3,61			1,34	4,05
1975	0,77	1,07	0,80	1,04	0,65	1,01	1993	0,69	1,34	0,28	1,57	0,79	1,48
1976	1,17	1,64	1,18	1,18	0,92	1,80	1994	0,54	1,41	0,61	1,77	0,71	1,39
1977	0,83	1,98					1995	0,38	1,44	0,68	1,13		
1978	0,76	1,14	0,57	1,34			1996	0,66	0,90	0,63	0,88		
1979	0,58	1,27	0,64	1,50	0,64	1,04	1997	0,28	1,24			0,48	1,68
1980	1,05	1,65	0,80	0,90	1,15	1,60	1998	0,75	1,74	0,62	1,60	0,68	0,93
1981	0,75	1,20	0,85	1,25	0,75	1,00	1999	0,54	0,88	0,21	1,17	0,67	1,21
1982	1,10	1,52			0,78	1,29	2000	0,54	1,29	0,57	0,91	0,71	1,30
1983	0,89	2,02	0,57	1,58			2001	0,55	1,49	0,90	0,87		
1984	0,96	1,80	0,57	1,77			2002	0,64	2,13				

Annexe 2.2 : Données de sol de la profondeur 0-20 cm
Annexe 2.2.1 : Carbone et azote totaux

Age	C total (g kg ⁻¹)						N total (g kg ⁻¹)					
	CC/SF	CC/AF	2AJ/SF	2AJ/AF	3AJ/SF	3AJ/AF	CC/SF	CC/AF	2AJ/SF	2AJ/AF	3AJ/SF	3AJ/AF
0	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	0,53	0,54	0,68	0,67	0,58	0,68
11	3,10	3,08	4,40	4,33	3,73	4,25	0,41	0,41	0,55	0,54	0,47	0,54
14	3,70	4,90		5,30	3,90	5,70	0,30	0,48	0,58	0,46	0,37	0,52
15	4,30	4,10	3,60	5,80	4,05	4,80	0,40	0,39	0,35	0,49	0,37	0,46
16	3,73	3,23	3,70	4,55	3,95	4,25	0,34	0,30	0,34	0,44	0,38	0,41
17	4,20	4,10					0,35	0,39	0,56			
18	4,40	4,60	3,60	4,70	3,80	3,95	0,32	0,45	0,45	0,47	0,37	0,43
19				5,00	4,20	3,95				0,47	0,39	0,36
22	2,30	2,30	3,00	4,20	3,45	4,05	0,24	0,24	0,35	0,48	0,42	0,47
23	1,70	2,00	3,30	3,60	3,10	4,90	0,18	0,20	0,33	0,35	0,33	0,45
24	2,30	2,60	3,17	4,27	2,55	3,35		0,33	0,39		0,39	0,38
41	2,08	3,48	2,98	4,45	3,30	4,10	0,17	0,27	0,26	0,35	0,28	0,35

SF = Sans fertilisation minérale, AF = Avec fertilisation minérale.

Annexe 2.2.2 : Phosphore total et potassium échangeable

Age	P total (mg kg ⁻¹)						K échangeable (Cmol ₊ kg ⁻¹)					
	CC/SF	CC/AF	2AJ/SF	2AJ/AF	3AJ/SF	3AJ/AF	CC/SF	CC/AF	2AJ/SF	2AJ/AF	3AJ/SF	3AJ/AF
0							0,33	0,31	0,30	0,27	0,24	0,27
11	63	93	76	94	65	83	0,16	0,15	0,15	0,18	0,14	0,18
14	61	89	64	97	70	77	0,11	0,12	0,13	0,10	0,15	0,15
15	91	96	65	111	74	93	0,12	0,10	0,10	0,18	0,11	0,14
16	69	95	89	103	77	89	0,13	0,12	0,09	0,16	0,11	0,15
17	49	70	61	107	73	108	0,12	0,13	0,12	0,14	0,10	0,12
18	87	139	121	86	73	127	0,15		0,11	0,17	0,11	0,22
19	84	88	126	110	89	113				0,19		
21			87	117	86	152				0,17		
22	89	112	81	197	89	149	0,11	0,14	0,10	0,21	0,14	0,17
23	36	110	52	133	73	157	0,13	0,11	0,13	0,13	0,14	0,14
24	86	109	97	193	73	175						
41							0,08	0,10	0,07	0,09	0,08	0,10

Annexe 2.2.3 : Calcium et magnésium échangeables

Age	Calcium échangeable						Magnésium échangeable					
	CC/SF	CC/AF	2AJ/SF	2AJ/AF	3AJ/SF	3AJ/AF	CC/SF	CC/AF	2AJ/SF	2AJ/AF	3AJ/SF	3AJ/AF
0	2,26	3,11	2,32	2,58	2,52	2,67	0,78	1,31	0,95	0,85	1,01	0,90
11	1,10	1,50	1,60	1,75	1,47	1,77	0,38	0,63	0,65	0,58	0,59	0,60
14	1,03	1,10	2,06	2,16	1,49	1,75	0,34	0,31	0,56	0,67	0,51	0,54
15			1,09	2,08	1,49	1,77	0,99	0,66	0,32	0,56	0,51	0,53
16	1,20	1,41	1,50	2,22	1,43	1,56	0,41	0,36	0,40	0,61	0,48	0,44
17	0,71	0,94	1,32	1,65	1,52	2,45	0,25	0,36	0,45	0,49	0,54	0,76
18			1,31	1,90	1,37	1,47	0,85	0,75	0,39	0,56	0,45	0,41
19	1,47	1,66										
22	1,25	1,24	1,69	1,59	1,38	1,60	0,49	0,39	0,56	0,52	0,55	0,62
23	0,75	0,86	1,23	2,08	1,50	2,52	0,30	0,25	0,38	0,48	0,48	0,69
41	1,14	1,38	1,21	1,78	1,69	2,10	0,40	0,46	0,37	0,41	0,50	0,57

Annexe 3 : Données relatives à l'essai fertilisation minérale conduite en sol ferralitique à Dalanda

Annexe 3.1 : Rendements de culture (t ha⁻¹)

Annexe 3.1.1 : Phase soustractive

Année	Culture	Traitement						
		1.5RR ^a	N ₀ -F ^b	RR	(-N)	(-S)	(-P)	(-K)
1974	Coton	1,89	1,03	1,67	0,99	1,55	1,55	1,47
1975	Sorgho	1,11	0,92	1,09	1,03	1,23	1,07	1,01
1976	Arachide	1,50	1,58	1,55	1,69	1,71	1,63	1,67
1977	Coton	1,21	0,83	1,14	0,83	1,06	0,99	1,07
1978	Maïs	2,00	0,88	1,76	0,92	1,79	1,59	1,48
1979	Sorgho	1,01	0,66	1,11	0,85	1,42	0,91	0,83
1980	Arachide	1,90	1,31	1,93	1,89	1,82	1,27	1,68

^a traitements discutés dans cette étude. (-N), (-S), (-P) et (-K) représentent les doses recommandées de fertilisation sans N, S, P et K respectivement.

Annexe 3.1.2 : Phase de redressement

Année	Culture	Traitement*						
		1.5RR/1.5RR ^a	1.5RR/RR ^a	No-F/1.5RR ^a	No-F/RR ^a	RR/1.5RR	RR/RR	(-N)/1.5RR
1981	Coton	1,65	1,27	1,70	1,30	1,63	1,20	1,70
1982	Maïs	2,27	2,04	2,34	1,74	2,01	1,92	1,35
1983	Sorgho	1,28	1,04	1,13	0,98	1,14	1,02	1,23
1984	Arachide	1,57	1,43	1,86	1,70	1,86	1,57	1,78
1985	Coton	1,61	1,38	1,74	1,53	1,62	1,54	1,72
1986	Maïs	3,68	3,42	3,44	3,38	3,44	3,18	3,51
1987	Coton	2,01	1,70	2,07	1,77	2,11	1,99	2,23

Année	Culture	Traitement*						
		(-N)/RR	(-S)/1.5RR	(-S)/RR	(-P)/1.5RR	(-P)/RR	(-K)/1.5RR	(-K)/RR
1981	Coton	1,44	1,68	1,37	1,60	1,22	1,53	1,37
1982	Maïs	1,71	2,32	2,01	2,24	1,88	1,92	1,88
1983	Sorgho	1,02	1,25	1,02	1,19	1,10	1,13	1,06
1984	Arachide	1,71	1,65	1,65	1,86	1,56	1,62	1,65
1985	Coton	1,46	1,65	1,57	1,72	1,30	1,72	1,62
1986	Maïs	3,32	3,75	3,35	3,36	3,15	3,63	3,22
1987	Coton	1,83	2,41	1,72	2,16	1,79	2,01	1,83

* Traitement X/Y signifie que la formule X d'engrais a été appliquée durant la phase soustractive (1974-1980) et la dose Y durant la phase de redressement (1981 à 1987).

^a Traitements discutés dans cette étude.

Annexe 3.1.3 : Phase de mise en culture généralisée de la parcelle expérimentale sans distinction des traitements et avec la dose recommandée de fertilisation minérale

Année	Culture		
	Coton	Maïs	Sorgho
1988	1,11		
1989	1,52		
1990	1,16		
1991			0,87
1992	1,20		
1993	1,28		
1994	0,70		
1995	0,53		
1996	1,21		
1997	1,18		
1998	1,49		
1999		1,52	
2000		1,20	
2001		1,01	
2002		1,43	
2003	0,71		
2004		0,85	
2005	1,16		

Annexe 3. 2 : Données de sol

Paramètre du sol	Année							
	1981 ³³				1985 ³⁴			
	No-F		1.5RR		No-F		1.5RR	
	0-20	20- 40	0-20	20- 40	0-20	20- 40	0-20	20- 40
Argile %	3,7	4,3	3,9	7,0	4,3	5,7	3,6	4,8
Limons %	3,7	3,1	3,3	8,6	2,4	3,0	3,0	2,7
Sable total %	92,6	92,6	92,8	84,4	93,3	91,3	93,4	92,5
Matière org %	0,82	0,65	0,79	0,84	0,84	0,57	0,57	0,55
Carbone %	0,48	0,38	0,46	0,49	0,49	0,33	0,33	0,32
Azote total ‰	0,36	0,30	0,32	0,49	0,40	0,26	0,37	0,29
C /N	13	13	14	10	12	13	9	11
P total ppm	94	78	86	146	135	98	120	73
P assimilable ppm	7	4	10	9	20	9	16	8
K total méq/100	2,92	2,53	2,92	14,79 ³⁵	-	-	-	-
Ca méq /100	1,72	1,29	1,40	1,49	1,72	1,24	1,48	1,00
Mg méq /100	0,42	0,29	0,36	0,60	0,43	0,22	0,39	0,18
K assimilable méq /100	0,12	0,06	0,24	0,20	0,15	0,06	0,14	0,05
² CEC méq /100	3,33	2,79	2,97	4,45	2,50	1,62	1,94	1,33
PH eau	6,35	6,10	5,95	6,15	6,50	6,15	6,40	6,00

³³ Le complexe échangeable a été déterminé à la méthode d'acétate d'ammonium

³⁴ Le complexe échangeable a été déterminé avec la méthode cobaltihexamine.

³⁵ A considérer avec prudence

Année 1988

Paramètre	Traitement													
	1.5RR/1.5RR		(- K)/1.5RR		(- N)/1.5RR		(- P)/1.5RR		(- S)/1.5RR		No-F/1.5RR		(FV)/1.5RR	
	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
Argile %	3	4,6	3,4	4,2	4,7	4,6	2,8	3,7	2,5	4,2	2,5	4,3	1,8	2,8
Limons %	3,9	3,7	3,4	2,4	2,5	4	3,7	4,3	3,7	4,5	3,4	3,6	3,7	3,4
Sable total %	93,1	91,7	93,2	93,4	92,8	91,4	93,5	92,1	93,9	91,2	94,1	92,1	94,7	93,8
Matière org %	0,81	0,69	0,74	0,71	0,69	0,58	0,81	0,67	0,84	0,67	0,71	0,69	0,17	0,64
Carbone %	0,47	0,40	0,43	0,41	0,40	0,34	0,47	0,39	0,49	0,39	0,41	0,40	0,41	0,37
Azote total ‰	0,36	0,31	0,37	0,33	0,30	0,32	0,35	0,32	0,37	0,34	0,33	0,33	0,36	0,33
C /N	13,1	12,9	11,6	12,4	13,3	10,6	13,4	12,2	13,2	11,5	12,4	12,1	11,4	11,2
P total ppm	90,1	95,0	115,1	95,8	88	90,3	107,8	85,8	100,2	92,2	90,7	99,6	98,0	86,8
P assim ppm	42,8	43,6	42,5	41,6	36,6	28,6	24,3	12,7	18,7	15,2	22,4	19,9	27,1	14,0
Ca méq /100	1,1	0,95	1,03	1,25	1,25	0,82	1,08	0,73	1,18	0,94	1,18	0,86	0,94	0,64
Mg méq /100	0,19	0,15	0,17	0,18	0,18	0,15	0,20	0,16	0,26	0,22	0,20	0,16	0,15	0,13
K as méq /100	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03
Na méq /100	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
S méq/100	1,35	1,15	1,25	1,47	1,47	1,02	1,52	1,11	1,67	1,36	1,60	1,26	1,27	0,97
H méq /100	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,1
CEC méq /100	1,42	1,39	1,31	1,54	1,43	1,12	1,46	1,03	1,42	1,16	1,30	1,13	1,10	0,89
V	95,1	82,7	95,4	95,5	102,8	91,1	1,04	1,08	1,17	1,18	1,23	1,11	1,16	1,09
PH eau	5,6	5,5	5,7	5,9	5,75	5,6	5,80	5,50	5,85	5,70	5,65	5,35	6,65	5,50

Paramètre	Traitement													
	(FV)/RR		No-F/RR		(- S)/RR		(- P)/RR		(- N)/RR		(-K)/RR		1.5RR/RR	
	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
Argile %	3,4	4,0	2,8	4,9	1,8	3,1	5,6	3,1	3,7	6,1	2,5	4,1	3,0	5,5
Limons %	3,1	5,2	3,1	3,7	3,4	3,1	3,7	3,4	4,6	4,2	3,1	4,1	3,7	4,6
Sable total %	93,5	90,8	94,1	91,4	94,8	93,8	90,7	93,6	91,7	89,7	94,4	91,9	93,3	89,9
Matière org %	0,69	0,58	0,74	0,64	0,45	0,53	0,60	0,69	0,81	0,58	0,72	0,62	0,64	0,65
Carbone %	0,40	0,34	0,43	0,37	0,26	0,31	0,35	0,40	0,47	0,34	0,42	0,36	0,37	0,38
Azote total ‰	0,31	0,30	0,37	0,32	0,31	0,31	0,33	0,34	0,40	0,36	0,37	0,34	0,34	0,35
C /N	12,9	11,3	11,6	11,6	8,4	10,0	10,6	11,8	11,8	9,4	11,4	10,6	10,9	10,9
P total ppm	103,4	83,2	92,3	85,4	94,0	82,3	85,2	94,5	133,1	89,4	87,9	90,8	94,4	90,4
P ass ppm	18,8	28,9	21,8	14,6	21,6	13,5	11,7	40,9	26,9	9,8	20,3	30,3	17,6	12,1
Ca méq /100	1,06	0,77	1,09	0,88	1,05	0,59	0,67	1,00	1,48	1,06	1,15	1,05	1,02	0,87
Mg méq /100	0,23	0,17	0,22	0,21	0,15	0,13	0,15	0,22	0,32	0,21	0,23	0,19	0,22	0,20
K ass méq /100	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
Na méq /100	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
S méq/100	1,50	1,15	1,52	1,29	1,37	0,91	1,03	1,44	2,01	1,49	1,58	1,45	1,47	1,30
Al méq/100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn méq/100	0,15	0,16	0,15	0,15	0,11	0,14	0,15	0,16	0,14	0,16	0,14	0,15	0,16	0,17
H méq /100	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CEC méq /100	1,35	1,10	1,39	1,16	1,25	0,92	0,91	1,25	1,84	1,34	1,41	1,30	1,35	1,22
PH eau	5,75	5,65	5,75	5,55	5,90	5,45	5,40	5,65	5,95	5,70	5,75	5,85	5,95	5,50

Dalanda 2007		Profondeur	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
			1.5RR/RR	1.5RR/RR	(-P)/RR	(-P)/RR	FV/RR	FV/RR	(-N)/RR	(-N)/RR	(-S)/ RR	(-S)/ RR	N0-F/ R	N0-F/ R	(-K)/RR	(-K)/ RR
Argiles	%		3,92	6,06	3,68	4,79	3,69	5,62	3,11	5,68	3,96	7,46	3,15	3,66	3,49	5,62
Limons fins	%		3,29	0,53	2,93	3,66	3,65	3,54	3,64	3,39	3,51	3,12	3,14	3,97	3,01	3,15
Limo grossi	%		2,54	3,78	3,28	3,46	3,21	3,16	2,81	3,00	2,89	3,17	3,01	3,15	2,93	2,76
Sables fins	%		33,10	35,17	35,14	34,86	32,05	34,26	31,00	33,99	34,86	31,12	31,38	32,96	35,06	32,63
Sables grossiers	%		57,16	54,46	54,97	53,24	57,39	53,42	59,45	53,93	54,77	55,13	59,33	56,26	55,52	55,84
pH eau			6,15	5,84	6,18	5,77	6,07	5,85	6,14	5,89	6,04	5,77	6,12	5,79	6,01	5,77
Matière org	%		0,78	0,47	0,70	0,47	0,79	0,42	0,65	0,43	0,66	0,45	0,59	0,39	0,66	0,42
Carbone org	%		0,45	0,27	0,41	0,27	0,46	0,25	0,38	0,25	0,39	0,26	0,34	0,23	0,38	0,24
Azote total	‰		0,27	0,17	0,25	0,19	0,29	0,15	0,24	0,17	0,24	0,17	0,21	0,14	0,23	0,15
C/N			16,83	16,41	16,53	14,04	15,86	16,42	15,41	15,00	16,03	15,02	16,29	16,13	16,75	15,77
P assi	mg/kg		3,58	1,94	3,56	1,90	3,54	1,32	3,04	1,36	2,94	1,22	2,48	1,42	3,46	1,74
S ass	mg/kg		1,58	1,57	1,54	1,46	1,42	1,66	1,50	1,49	1,57	1,68	1,80	1,48	1,47	1,83
Acétate																
Ca éch	me/100g		1,19	0,78	1,22	0,75	1,35	0,84	1,14	0,68	1,14	0,78	1,13	0,69	1,19	0,70
Mg éch	me/100g		0,25	0,17	0,24	0,17	0,23	0,17	0,24	0,18	0,23	0,23	0,22	0,20	0,20	0,18
K éch	me/100g		0,09	0,05	0,07	0,04	0,06	0,04	0,07	0,05	0,06	0,05	0,08	0,05	0,06	0,05
Na éch	me/100g		0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
CEC	me/100g		2,32	1,73	1,94	2,01	2,26	1,86	2,10	1,33	1,89	1,92	1,80	1,49	1,99	1,85
TS	%		66,98	58,44	79,43	48,21	73,23	57,53	70,00	69,77	76,24	56,35	80,28	63,15	73,17	50,22
Cobatihexamine																
Ca éch	me/100g		1,06	0,75	1,13	0,67	1,22	0,81	1,04	0,67	1,04	0,74	1,02	0,67	1,09	0,66
Mg éch	me/100g		0,24	0,17	0,23	0,15	0,21	0,16	0,22	0,18	0,22	0,22	0,21	0,19	0,17	0,17
K éch	me/100g		0,06	0,04	0,06	0,07	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,04
Na éch	me/100g		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00
Al éch	me/100g		0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
Mn éch	me/100g		0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02
H éch	me/100g		0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,02
CEC	me/100g		1,66	1,23	1,66	1,07	1,74	1,24	1,59	1,14	1,54	1,24	1,64	0,94	1,38	0,97
TS	%		81,90	78,00	85,40	83,80	85,10	81,70	82,40	78,80	85,70	81,80	79,40	102,10	94,80	89,90
pH Co			5,52	5,02	5,58	4,96	5,60	5,20	5,53	5,11	5,55	5,08	5,91	5,22	5,60	5,11
K total	g/kg		1,07	1,23	0,97	1,18	1,09	1,29	1,02	1,26	1,06	1,35	1,03	1,24	1,01	1,24
P total	mg/kg		100,32	85,98	95,16	84,25	99,60	82,81	92,84	83,93	109,13	85,33	88,37	80,95	95,89	85,03

Profondeur		0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
		1.5RR/ 1.5RR	1.5RR/ 1.5RR	(-P)/ 1.5RR	(-P)/ 1.5RR	FV/ 1.5RR	FV/ 1.5RR	(-N)/ 1.5RR	(-N)/ 1.5RR	(-S)/ 1.5RR	(-S)/ 1.5RR	N0-F/ 1.5RR	N0-F/ 1.5RR	(-K)/ 1.5RR	(-K)/ 1.5RR
Argiles	%	2,81	5,22	2,04	6,79	3,33	5,23	3,63	5,32	2,53	5,03	3,00	5,26	2,20	4,13
Limons fins	%	4,41	3,59	3,61	3,42	2,31	3,03	2,67	2,03	3,47	3,97	2,48	3,65	2,75	3,54
Limon gros	%	3,02	2,03	3,61	1,98	3,27	2,49	2,64	4,34	2,32	3,49	2,01	2,82	2,80	3,62
Sables fins	%	32,48	36,23	34,51	33,84	34,63	31,77	36,78	38,49	34,04	33,45	34,58	35,30	29,83	37,61
Sables gros	%	57,27	52,93	56,23	53,96	56,46	57,47	54,28	49,82	57,63	54,06	57,94	52,97	62,43	51,11
pH eau		6,09	5,79	6,20	5,79	6,19	5,79	6,43	5,68	6,12	5,84	6,16	5,83	6,23	5,88
Matière org	%	0,60	0,39	0,63	0,42	0,54	0,39	0,63	0,42	0,73	0,46	0,69	0,44	0,80	0,50
Carbone org	%	0,35	0,22	0,37	0,24	0,31	0,23	0,37	0,24	0,43	0,27	0,40	0,25	0,46	0,29
Azote total	‰	0,21	0,15	0,24	0,16	0,21	0,16	0,23	0,17	0,27	0,19	0,26	0,18	0,33	0,24
C/N		16,72	15,20	15,36	14,91	14,69	14,44	16,13	14,07	16,01	14,07	15,51	13,90	14,28	12,05
P assi	mg/kg	3,58	1,72	2,78	1,72	3,20	1,82	2,64	2,36	3,96	1,90	3,06	1,68	5,38	3,18
S assim	mg/kg	2,41	4,20	1,26	1,65	1,82	3,24	1,63	3,14	1,49	3,17	1,41	1,65	1,25	1,55
Complexe Acétate															
Ca éch	me/100g	1,09	0,67	1,09	0,68	0,91	0,59	1,06	0,71	1,28	0,82	1,22	0,82	1,49	0,92
Mg éch	me/100g	0,18	0,14	0,21	0,17	0,17	0,16	0,21	0,16	0,27	0,19	0,20	0,17	0,25	0,17
K éch	me/100g	0,05	0,04	0,06	0,04	0,08	0,11	0,07	0,11	0,08	0,11	0,05	0,06	0,06	0,06
Na éch	me/100g	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01
Somme	me/100g	1,32	0,86	1,37	0,90	1,18	0,86	1,35	1,00	1,64	1,14	1,48	1,07	1,82	1,16
CEC	me/100g	1,75	1,77	1,68	1,93	2,22	1,66	2,02	2,13	1,97	2,08	2,01	1,90	2,39	1,80
Cobaltihexamine															
Ca éch	me/100g	0,98	0,76	1,00	0,67	0,87	0,54	1,02	0,75	1,14	0,80	1,13	0,78	1,34	0,90
Mg éch	me/100g	0,16	0,15	0,19	0,17	0,17	0,14	0,20	0,17	0,25	0,19	0,18	0,16	0,24	0,16
K éch	me/100g	0,04	0,04	0,05	0,04	0,06	0,08	0,05	0,07	0,06	0,09	0,05	0,05	0,05	0,04
Na éch	me/100g	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Al éch	me/100g	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
Mn éch	me/100g	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02
H éch	me/100g	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
CEC	me/100g	1,33	1,01	1,30	0,94	1,20	0,83	1,41	1,13	1,57	1,19	1,50	1,12	1,76	1,18
K total	g/kg	0,91	1,15	1,04	1,24	0,90	1,10	0,98	1,26	0,96	1,26	0,90	1,14	0,90	1,14
P total	mg/kg	91,65	85,20	98,45	90,21	92,31	87,05	96,35	90,44	103,95	97,88	94,81	83,88	111,62	95,52

**Annexe 4 : Données relatives aux différentes rotations culturales comparées en sol ferrugineux à
Elavagnon**

Annexe 4.1 : Rendements de cultures (t ha⁻¹)

Période expérimentales							Période monoculture de coton essentiellement*					
Année	Saison agricole	Culture	Rotation A	Rotation B	Rotation C	Rotation D	Année	Culture	Ancien Bloc Rotation A	Ancien Bloc Rotation B	Ancien Bloc Rotation C	Ancien Bloc Rotation D
1977	1	-	-	-	-	-						
	2	Sorgho	1,22	1,57	2,91	2,69	1987	Coton	1,08	1,09	1,08	1,08
1978	1	Niébé	1,02	1,64	1,68	1,71	1988	Coton	1,63	1,41	1,67	1,95
	2	Maïs	2,00	1,82	2,12	2,12	1989	Coton	1,10	1,02	1,13	1,08
1979	1	Arachide	-	1,58	-	1,66	1990	Coton	1,33	1,58	1,71	1,83
	2	Coton	1,43	1,58	1,54	1,66	1991	Coton	1,13	0,99	1,59	1,20
1980	1	-	-	-	-	-	1992	Coton	1,31	0,84	0,87	1,35
	2	Sorgho	1,36	1,64	3,36	3,02	1993	Niébé	0,86	1,10	0,97	1,04
1981	1	Niébé	0,52	0,62	0,51	0,51	1994	Coton	0,70	0,67	1,00	0,32
	2	Maïs	1,86	2,35	2,34	2,37	1995	Coton	0,30	0,30	0,30	0,38
1982	1	Arachide	-	1,66	-	2,16	1996	Coton	1,22	1,22	1,22	1,08
	2	Coton	1,99	1,66	2,39	2,16	1997	Coton	1,10	0,95	0,84	0,98
1983	1	-	-	-	-	-	1998	Maïs	1,32	1,56	1,49	1,46
	2	Sorgho	1,22	1,57	2,91	2,70	1999	Coton	1,56	0,85	1,10	1,12
1984	1	Niébé	1,53	0,97	1,27	1,52	2000	Maïs	1,32	1,56	1,49	1,46
	2	Maïs	2,51	3,69	2,88	2,69	2001	Coton	0,72	1,10	1,07	1,24
1985	1	Arachide	-	1,35	-	1,88	2002	-	1,06 C	1,56 M	1,49 M	1,46 M
	2	Coton	1,62	1,35	2,00	1,04	2003	-	1,32 M	1,240C	1,37 M	0,42 C
1986	1	-	-	-	-	-	2004	Maïs	0,53	0,53	0,53	0,53
	2	Sorgho	1,08	1,50	2,45	2,36	2005	-	1,32 M	1,56 M	1,48 M	1,08 C

* C = Coton, M = Maïs et S = Sorgho.

Annexe 4.2 : Données de sol

Année 1979

Paramètre	Parcelles							
	1		5		6		10	
	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40
Matière org %	0,95	0,81	1,19	0,98	1,52	1,02	1,38	0,84
Carbone %	0,55	0,47	0,69	0,57	0,88	0,59	0,80	0,49
Azote total ‰	0,57	0,51	0,65	0,58	0,65	0,55	0,67	0,59
C /N	10	9	11	10	13	11	12	8
P total ppm	117	169	288	264	214	217	213	250
P assimilable ppm	11	10	23	18	17	11	16	10
K total méq/100	13,44	13,95	14,98	16,00	14,54	21,12	20,86	17,66
Ca méq /100	3,45	3,12	4,14	3,51	5,07	3,23	5,28	3,18
Mg méq /100	1,10	1,08	0,90	0,82	1,28	1,03	1,18	0,83
K assimilable méq /100	0,08	0,07	0,17	0,11	0,18	0,14	0,20	0,12
Na méq /100	0,04	0,01	0,01	0,03	0,013	0,01	0,02	0,01
S méq/100	4,67	4,28	5,22	4,47	6,56	4,41	6,68	4,14
² CEC méq /100	5,39	5,17	6,16	5,25	6,67	5,35	6,66	5,38
V	87	83	85	85	98	82	-	77
PH eau	6,00	6,05	6,30	6,50	6,90	6,50	7,05	6,65

Parcelles 10, 1, 5 et 6 correspondent aux rotations A, B, C et D respectivement

Année 1980

Paramètre	Parcelle							
	3		7		12		13	
	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
Profondeur (cm)	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
Matière org %	1,08	1,50	1,57	1,24	1,88	1,26	1,38	0,72
Carbone org %	0,63	0,87	0,81	0,72	1,09	0,73	0,80	0,42
Azote total ‰	0,56	0,58	0,76	0,62	0,82	0,58	0,56	0,46
C/N	11,25	15,00	10,66	11,61	13,29	12,59	14,29	9,13
P assi PPM	15,00	11,00	18,00	18,00	26,00	14,00	21,00	10,00
Ca éch me/100g	4,08	3,68	5,23	5,34	6,76	6,00	6,24	2,87
Mg éch me/100g	1,18	0,99	1,08	0,95	1,40	1,16	0,97	0,73
K éch me/100g	0,20	0,08	0,21	0,16	0,52	0,18	0,18	0,09
Na éch me/100g	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03	0,05	0,07
Somme me/100g	5,49	4,76	6,53	6,48	8,69	7,37	7,44	3,76
CEC me/100g	5,86	5,63	7,18	6,44	7,94	5,88	6,37	4,28
TS %	94,00	85,00	92,00	100,00	100,00	100,00	100,00	88,00
K total me/100g	6,24	5,33	6,98	7,07	9,73	9,54	10,17	10,69
P total PPM	179,00	174,00	248,00	238,00	261,00	216,00	220,00	156,00

Parcelles 3, 7, 12 et 13 correspondent aux rotations A, B, C et D respectivement

Année 1982

Paramètre	Parcelle							
	1		5		6		10	
	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40
Horizons								
Argile %	1,0	1,3	0,6	1,9	1,3	1,6	0, 1	1,3
Limon fin %	2,9	3,2	2,6	3,2	2,6	3,5	3,2	3,9
Limon grossier %	7,4	6,8	6,4	7,7	4,5	3,1	2,0	5,3
Sable fin %	32,0	30,9	33,7	39,7	36,1	29,6	27,2	27,5
Sable grossier %	56,7	57,9	56,7	47,5	55,4	62,1	67,5	62,1
Matière org %	0,59	0,65	0,77	0,72	0,83	0,81	0,90	0,65
Carbone %	0,34	0,38	0,45	0,42	0,49	0,47	0,52	0,38
Azote total %o	0,39	0,39	0,48	0 ,45	0,50	0,43	0,55	0,49
C /N	9	10	9	9	10	11	9	8
P total ppm	212	201	300	296	248	220	244	256
P assimilable ppm	26	33	49	35	28	20	30	25
Ca méq /100	3,39	3,44	4,02	4,33	4,21	3,92	4,23	4,58
Mg méq /100	1,10	0,95	0,76	0,73	0,88	0,82	0,86	0,85
K total méq /100	13,81	15,90	18,36	18,20	18,50	16,95	22,40	24,06
K assimilable méq /100	0,18	0,13	0,32	0,12	0,33	0,17	0,37	0,17
Na méq /100	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
S méq /100	4,68	4,53	5,14	5,20	5,43	4,92	5,47	5,61
CEC méq /100	5,30	5,50	5,52	5,36	5,69	5,18	5,54	5,99
V	88	82	93	97	95	95	99	94
PH eau	6,30	6,30	6,45	6,65	6,60	6,55	7,10	6,95

Année 1983

Paramètre	Parcelle							
	3		7		12		13	
	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40
Profondeur (cm)								
K total %o	7,66	7,50	7,82	7,52	10,71	10,27	11,02	10,50
K total méq/100	19,65	19,22	20,06	19,28	27,45	26,33	28,25	26,92
Argile %	6,9	7,7	6,4	7,1	7,4	6,8	5,9	6,1
Limon fin %	2,7	3,1	3,1	3,1	2,8	3,4	3,1	3,7
Limon grossier %	9,6	7,4	5,4	5,9	5,7	5,0	6,0	6,0
Sable fin %	47,9	39,7	29,9	33,3	29,4	28,5	30,4	27,1
Sable grossier %	32,8	42,1	55,2	50,6	54,7	56,4	54,7	57,1
Matière org %	0,77	0,50	0,76	0,91	1,12	0,93	0,77	0,62
Carbone %	0,45	0,29	0,44	0,53	0,65	0,54	0,45	0,36
Azote total %o	0,42	0,27	0,41	0,41	0,59	0,50	0,41	0,31
C /N	11	11	11	13	11	11	11	12
P total ppm	186	163	219	207	236	194	214	186
P assimilable ppm	23	10	22	13	22	15	24	15
Ca méq /100	3,60	3,33	4,27	4,06	5,99	5,17	4,78	4,34
Mg méq /100	1,11	0,76	0,90	0,79	1,02	0,84	0,86	0,69
K assimilable	0,29	0,10	0,29	0,16	0,34	0,23	0,20	0,12
Na méq/100	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
S méq/100	5,03	4,22	5,47	5,02	7,37	6,26	5,87	5,19
CEC méq/100	5,60	5,17	5,21	5,40	5,32	5,79	6,76	6,93
V	90	82	-	93	-	-	87	75
PH eau	6,55	6,25	6,75	6,50	6,90	6,95	6,55	6,60

Année 1985

Paramètre	Parcelle							
	1		5		6		10	
	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40
Profondeur (cm)	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40	0- 20	20- 40
Argile %	3,4	5,1	4,4	2,6	5,1	2,5	3,5	4,1
Limons %	1,6	3,2	2,8	3,2	2,9	3,5	2,6	2,9
Sable total %	95,0	91,7	92,7	94,2	92,0	94,0	93,9	93,0
Matière org %	1,10	0,88	0,95	1,05	0,79	0,77	1,00	0,69
Carbone %	0,64	0,51	0,55	0,61	0,46	0,45	0,58	0,40
Azote total ‰	0,48	0,65	0,47	0,48	0,37	0,46	0,43	0,36
C /N	13	8	12	13	12	10	13	5
P total ppm	211	194	330	352	257	287	272	248
P assimilable ppm	39	9	18	46	11	25	26	13
Ca méq /100	2,52	3,33	3,70	3,94	4,06	4,55	4,13	4,26
Mg méq /100	0,72	0,81	0,60	0,94	0,71	0,93	0,87	0,70
K assimilable méq /100	0,30	0,08	0,10	0,40	0,14	0,27	0,28	0,18
Na méq /100	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
S méq/100	3,59	4,25	4,42	5,30	4,93	5,77	5,30	5,13
² CEC méq /100	4,67	6,57	4,43	5,15	4,89	5,54	4,77	4,89
V	77	93	100	-	-	-	-	-
PH eau	8,38 ³⁶	7,80	6,65	7,10	7,05	7,10	6,90	7,15

³⁶ Valeurs anormalement élevées

Elavagnon 2007		0-20 1	20-40 1	0-20 3	20-40 3	0-20 5	20-40 5	0-20 6	20-40 6	0-20 7	20-40 7	0-20 10	20-40 10	0-20 12	20-40 12	0-20 13	20-40 13
Argiles	%	6,87	8,29	6,94	7,54	6,17	6,65	6,56	7,53	6,11	7,68	6,07	7,49	5,27	6,90	6,21	6,95
Limons fins	%	1,79	4,11	2,86	3,37	2,89	4,04	3,28	3,88	3,20	3,68	3,02	3,80	3,24	4,03	3,51	3,77
Limonsgrs	%	5,80	6,43	5,57	6,22	5,38	5,81	5,18	5,38	5,40	6,03	4,85	5,86	4,34	4,62	4,99	5,52
Sables fins	%	31,76	32,11	30,76	34,30	29,14	25,68	29,17	24,77	27,70	28,10	23,66	25,91	24,21	23,42	24,82	29,37
Sables gros	%	53,78	49,07	53,88	48,57	56,42	57,82	55,81	58,44	57,59	54,51	62,41	56,94	62,94	61,03	60,47	54,39
pH eau		6,36	6,29	6,42	6,42	6,47	6,49	6,63	6,54	6,71	6,51	6,77	7,28	6,54	6,64	6,39	6,50
Matière org	%	0,83	0,74	0,93	0,67	0,83	0,66	1,11	0,79	1,15	0,74	0,81	0,99	1,07	0,74	0,91	0,67
Carbone org	%	0,48	0,43	0,54	0,39	0,48	0,38	0,64	0,46	0,66	0,43	0,47	0,57	0,62	0,43	0,53	0,39
Azote total	‰	0,34	0,25	0,38	0,24	0,31	0,23	0,43	0,28	0,44	0,30	0,28	0,34	0,39	0,26	0,32	0,23
C/N		14,30	17,02	14,27	16,06	15,79	16,65	14,94	16,41	14,98	14,57	16,77	16,89	15,99	16,47	16,85	17,29
P ass	mg/kg	6,28	3,50	6,42	4,86	12,50	8,66	7,08	5,26	8,50	3,46	6,80	9,92	6,20	3,82	6,04	3,92
S assi	mg/kg	2,48	1,59	2,18	1,32	1,59	1,31	2,01	1,43	1,99	1,57	2,03	3,04	2,10	1,88	2,32	1,34
Acétate																	
Ca éch	me/100g	2,64	3,55	2,92	3,25	2,71	2,76	3,31	3,25	3,20	2,99	3,88	5,72	3,28	3,03	2,87	2,86
Mg éch	me/100g	0,79	0,99	0,92	1,00	0,57	0,57	0,69	0,65	0,76	0,69	0,51	0,57	0,63	0,61	0,56	0,58
K éch	me/100g	0,16	0,13	0,18	0,13	0,19	0,16	0,25	0,18	0,21	0,16	0,24	0,22	0,19	0,20	0,15	0,15
Na éch	me/100g	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,06	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
Somme	me/100g	3,60	4,70	4,04	4,42	3,49	3,55	4,26	4,10	4,20	3,87	4,66	6,54	4,13	3,87	3,60	3,62
CEC	me/100g	4,33	5,70	5,11	5,34	4,24	4,58	4,97	5,15	4,55	4,81	4,20	4,85	5,04	5,04	4,22	4,07
TS	%	83,23	82,46	79,08	82,72	82,36	77,58	85,71	79,69	92,20	80,42	> 100	> 100	81,92	76,85	85,26	89,02
Cobaltihexamine																	
Ca éch	me/100g	2,48	3,45	2,57	2,99	2,63	2,73	3,16	3,07	3,04	2,81	3,61	4,80	2,98	2,83	2,80	2,93
Mg éch	me/100g	0,72	0,95	0,78	0,91	0,53	0,53	0,62	0,57	0,69	0,61	0,47	0,52	0,54	0,54	0,52	0,56
K éch	me/100g	0,15	0,12	0,15	0,12	0,18	0,14	0,22	0,15	0,20	0,15	0,20	0,21	0,16	0,16	0,15	0,14
Na éch	me/100g	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
Mn éch	me/100g	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00	0,04	0,01	0,05	0,02
H éch	me/100g	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CEC	me/100g	4,47	5,67	4,82	4,77	4,21	4,32	5,04	4,81	4,85	4,23	5,13	5,86	4,61	4,33	4,31	4,51
TS	%	75,30	79,90	72,70	84,70	79,80	79,30	79,70	79,20	81,50	84,70	83,70	94,80	80,20	81,90	80,80	81,00
K total	g/kg	7,83	7,59	7,84	8,22	8,60	7,48	8,20	7,82	8,28	8,40	9,52	10,52	10,71	8,72	11,52	11,91
P total	mg/kg	237,84	256,11	282,36	237,60	382,06	409,91	286,71	346,03	262,92	276,87	354,16	287,16	235,74	344,91	202,63	212,07

Annexe 5 : Nouveau dispositif expérimental installé en vertisol à Kolokopé

Annexe 5.1 : Protocole expérimental

Titre de l'essai : Minéralisation de la matière organique du sol

But de l'essai

Le but de l'essai est d'évaluer l'impact des différentes pratiques culturales sur la minéralisation de la matière organique du sol.

Implantation

L'essai est implanté à la station de Kolokopé sur la parcelle E₁₁.

Dispositif expérimental

L'essai comporte 5 modalités correspondant à de différentes pratiques culturales. Ce sont :

- 1- Apport de fumier après labour et avant buttage (10 t ha^{-1}) + apport d'engrais minéraux à la dose recommandée en culture cotonnière ($150 \text{ kg de NPKSB} + 50 \text{ kg d'urée à l'hectare}$),
- 2- Culture sous couverture végétale (30 t ha^{-1} de tiges de cotonnier sont utilisées en paillis) et les apports d'engrais minéraux sont effectués à la dose recommandée en culture cotonnière,
- 3- Apport uniquement d'engrais minéraux à la dose recommandée en culture cotonnière,
- 4- Apport d'engrais minéraux à la dose réellement observée en milieu paysan (50% de la dose recommandée en culture cotonnière)
- 5- Témoin sans fertilisation.

La parcelle élémentaire correspond à une superficie de $20\text{m} \times 16\text{m}$. Elle correspond à 20 lignes de 20m chacune espacées de 0.8 m . Deux parcelles élémentaires consécutives sont séparées dans le sens de la largeur par une allée de 2m (pas d'allée dans le sens de la longueur). L'essai comporte 5 blocs et un bloc est constitué de parcelles élémentaires ayant des teneurs et composition isotopique en C du même ordre de grandeur (elles peuvent ne pas être consécutives). La superficie totale correspondante à une des modalités est de 0.16 ha ($20\text{m} \times 16\text{m} \times 5$). La superficie totale de la parcelle expérimentale est de 1 ha , y compris les allées.

Conduite culturale

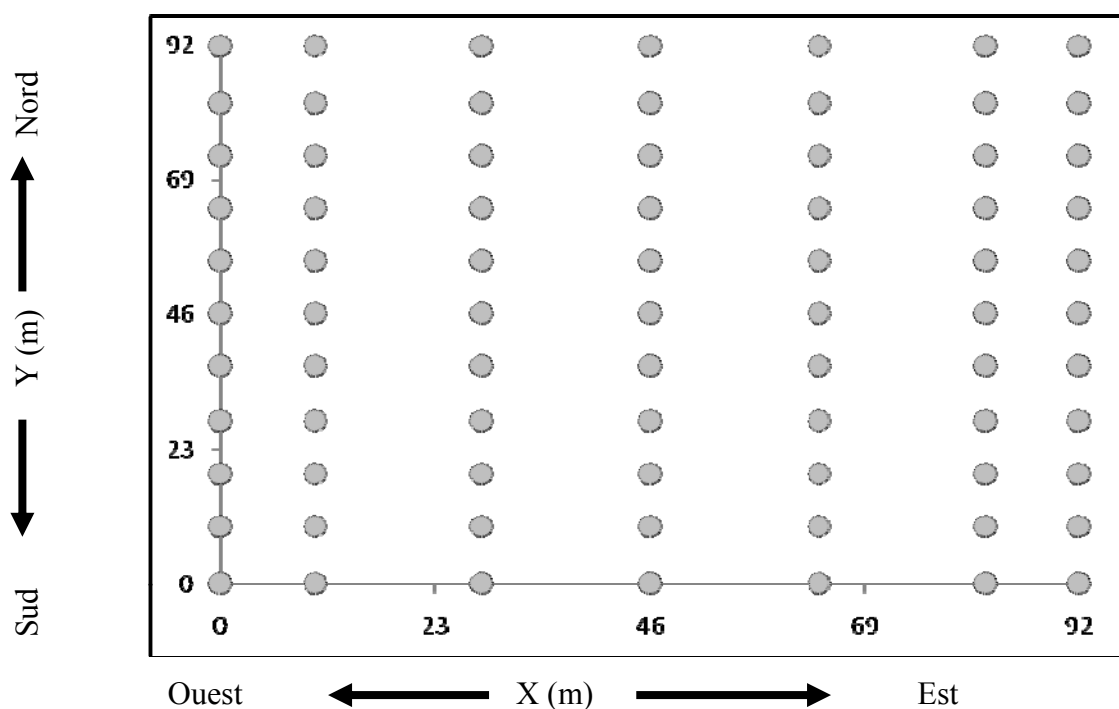
Le fumier est épandu sur les parcelles élémentaires correspondant à la modalité 1 (0.16 ha) juste après le labour et le prélèvement des échantillons de sol. Les parcelles élémentaires correspondant à la modalité 2 (0.16 ha) ne sont pas labourées et sont maintenues en permanence couvertes au moyen des tiges de cottonniers. Le cottonnier est semé suivant la densité de semis vulgarisée. La parcelle expérimentale est désherbée au semis avec l'herbicide, sarclée dès que nécessaire puis les mauvaises

herbes sont exportées de la parcelle. Les doses d'engrais minéraux correspondantes aux différentes modalités sont apportées entre 15 et 20^{ème} jours après le semis pour le complexe NPKSB et au 40^{ème} jour après le semis pour l'urée. Le cotonnier reçoit 6 traitements insecticides suivant le calendrier en vulgarisation. Le cotonnier des 10 lignes centrales de chaque parcelle élémentaire est récolté puis pesé. Le cotonnier des 5 lignes externes de toutes les parcelles élémentaires est récolté en vrac. Dès que les conditions météorologiques le permettent, les tiges de cotonniers sont arrachées, pesées puis stockées afin d'être utilisées comme paillis en SCV la campagne prochaine.

Observations

- Cent cinquante quatre (154) échantillons de sol à raison de 77 sur chacune des profondeurs 0-5 et 10-15 cm ont été prélevés afin de déterminer les caractéristiques initiales de la parcelle. Les analyses (teneurs en C et N, composition isotopique et vitesse de minéralisation de C sur des échantillons à $\delta^{13}C$ faible, moyen et élevé) ont été effectuées.
- Juste après le labour, de nouveaux échantillons de sol sont prélevés dans les quinze premiers centimètres du sol et à l'intérieur de chaque parcelle élémentaire. Cinq sondages de sol (1 au centre de la parcelle élémentaire et 4 équidistants de 5m du premier) sont effectués et un échantillon composite de sol est constitué.
- Les températures du sol à 10 et 15 cm sont enregistrées au moyen des sondes.

Annexe 5.2 : Repérage des points de prélèvement d'échantillons de sol



Annexe 5.3 : Données initiales de sol

Coordonnée*		0-5 cm			10-15 cm			Coordonnée		0-5 cm			10-15 cm		
X (m)	Y (m)	C (g kg ⁻¹)	δ ¹³ C (‰)	N (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	δ ¹³ C (‰)	N (g kg ⁻¹)	X (m)	Y (m)	C (g kg ⁻¹)	δ ¹³ C (‰)	N (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	δ ¹³ C (‰)	N (g kg ⁻¹)
0	92	16.30	-16.41	1.00	16.67	-15.82	1.02	46	46	20.00	-17.35	1.20	19.32	-16.5	1.19
10	92	20.24	-17.30	1.23	16.66	-16.01	0.85	64	46	17.62	-17.78	0.97	17.01	-17.01	0.90
28	92	18.05	-16.89	1.20	18.25	-16.2	1.12	82	46	19.40	-19.52	1.40	17.73	-18.27	1.21
46	92	19.58	-17.85	1.15	16.59	-16.51	0.90	92	46	20.90	-19.68	1.40	16.54	-17.43	0.95
64	92	22.00	-16.85	1.40	21.35	-16.32	1.24	0	37	19.95	-18.15	1.30	15.80	-16.9	1.01
82	92	20.47	-17.43	1.16	17.72	-16.59	0.89	10	37	18.30	-16.93	0.89	15.03	-16.13	0.73
92	92	21.25	-18.69	1.30	19.73	-17.22	1.16	28	37	16.05	-15.83	1.10	14.98	-15.73	0.95
0	82	15.41	-17.02	0.82	14.77	-17.07	0.77	46	37	19.81	-16.86	1.05	17.41	-15.46	0.88
10	82	21.05	-18.55	1.30	17.97	-17.07	1.10	64	37	19.95	-17.88	1.30	17.20	-16.69	1.09
28	82	20.22	-17.84	1.13	16.43	-16.2	0.80	82	37	26.10	-19.52	0.95	14.36	-18.07	0.78
46	82	20.25	-16.85	1.30	18.85	-16.04	1.19	92	37	16.50	-20.15	1.20	13.73	-18.36	0.94
64	82	22.10	-18.00	1.20	19.72	-17.17	1.13	0	28	19.00	-20.68	1.20	17.02	-19.20	1.00
82	82	22.60	-17.26	1.50	21.50	-16.09	1.31	10	28	19.30	-16.66	1.20	11.60	-15.26	0.70
92	82	21.29	-20.38	1.17	17.59	-18.34	0.96	28	28	15.41	-16.22	0.76	13.83	-15.60	0.62
0	73	19.50	-17.97	1.30	14.85	-16.74	0.99	46	28	22.30	-16.14	1.40	16.20	-15.88	0.97
10	73	19.43	-15.94	1.00	15.83	-16.05	0.83	64	28	17.64	-17.65	0.99	17.65	-16.89	0.95
28	73	21.90	-17.86	1.40	15.98	-16.44	1.04	82	28	16.20	-18.55	1.20	14.60	-17.07	0.97
46	73	20.68	-16.94	1.17	19.18	-16.11	1.07	92	28	13.32	-17.90	0.68	11.80	-17.17	0.60
64	73	23.15	-17.66	1.50	17.56	-16.62	1.13	0	19	19.45	-18.88	1.30	14.20	-16.66	0.89
82	73	21.29	-18.33	1.36	17.91	-16.94	1.06	10	19	14.45	-15.88	0.64	12.43	-15.32	0.54
92	73	23.05	-16.79	1.50	19.42	-16.25	1.27	28	19	14.75	-16.79	1.00	11.70	-15.84	0.73
0	64	15.70	-17.81	0.83	12.83	-16.73	0.60	46	19	18.50	-16.31	0.94	13.83	-15.83	0.67
10	64	16.15	-16.69	1.10	14.01	-15.85	0.88	64	19	16.70	-17.86	1.10	15.50	-16.4	0.98
28	64	17.80	-16.67	0.94	17.34	-15.81	0.88	82	19	15.40	-19.40	0.93	13.56	-17.33	0.73
46	64	25.25	-18.43	1.60	20.05	-16.53	1.30	92	19	14.60	-16.50	1.00	12.10	-15.55	0.77
64	64	20.37	-17.75	1.15	19.07	-16.91	1.06	0	10	14.60	-16.90	0.70	13.20	-16.29	0.61
82	64	21.80	-17.73	1.50	20.27	-16.78	1.31	10	10	17.60	-16.51	1.10	14.50	-16.15	0.88
92	64	25.21	-19.53	1.61	21.11	-17.81	1.20	28	10	15.20	-16.53	0.73	12.14	-16.02	0.55
0	55	17.95	-18.26	1.20	15.22	-17.29	1.04	46	10	17.20	-17.42	1.10	13.40	-15.68	0.79
10	55	18.35	-16.64	0.98	15.59	-15.96	0.81	64	10	18.90	-17.72	1.01	15.04	-16.45	0.73
28	55	19.05	-17.43	1.30	15.58	-16.9	1.02	82	10	21.75	-19.16	1.40	15.80	-16.95	1.04
46	55	20.19	-17.46	1.13	18.69	-16.65	1.04	92	10	15.10	-17.00	0.79	12.81	-16.26	0.64
64	55	19.65	-	1.40	19.14	-17.82	1.28	0	0	19.60	-15.69	1.20	15.50	-15.14	0.97
82	55	18.71	-18.77	1.13	19.81	-17.75	1.09	10	0	16.30	-15.21	0.82	12.98	-14.65	0.59
92	55	20.50	-17.94	1.40	19.66	-17.93	1.36	28	0	19.70	-17.28	1.30	13.90	-15.28	0.84
0	46	17.14	-16.40	0.79	13.63	-16.08	0.68	46	0	16.60	-15.93	0.82	14.97	-15.37	0.67
10	46	13.45	-15.97	0.80	11.95	-15.79	0.76	64	0	20.00	-16.28	1.20	15.70	-15.54	0.97
28	46	18.00	-16.30	0.96	16.17	-15.98	0.88	82	0	20.60	-17.59	1.16	18.72	-16.22	0.98
								92	0	21.20	-16.24	1.30	16.90	-15.51	1.07

* Le point le plus au Sud-ouest de la parcelle a pour coordonnées X= 0 et Y= 0 (annexe 5.2). Pour les autres points, X représente la distance (m) qui le sépare au point de coordonnées (0, 0) dans la direction Ouest-est et Y, la distance (m) entre ces deux points dans la direction Sud-nord.

Annexe 5.4 : Plan parcellaire

Nord

↑

→ Est

B3 T3	B4 T1	B4 T5	B5 T3	B5 T1
B2 T5	B4 T3	B5 T2	B5 T4	B5 T5
B1 T1	B2 T2	B3 T1	B4 T4	B4 T2
B1 T2	B2 T3	B3 T4	B3 T5	B2 T1
B1 T3	B1 T5	B1 T4	B3 T2	B2 T4

B= bloc, T1= Labour + terre de parc + dose recommandée engrais NPK, T2= Non-labour + paillage + dose recommandée engrais NPK, T3 = Labour + dose recommandée engrais NPK, T4 = Labour + demi-dose recommandée engrais NPK et T5 = Labour sans fertilisation.

Annexe 5.5 : Rendement en coton-graine (kg ha⁻¹) à la première année expérimentale

Traitements	Blocs					Moyenne traitement*
	1	2	3	4	5	
T1	1718	1461	1939	1304	1347	1554^a
T2	1129	884	1209	1188	1171	1116^b
T3	1211	1442	639	1431	1028	1150^b
T4	955	1016	1013	1027	856	974^c
T5	613	570	752	531	770	648^d
Moyenne bloc	1125	1075	1110	1096	1035	1088

* Les rendements moyens marqués de lettres différentes sont statistiquement différents ($\alpha = 5\%$)